



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Avaluació de l'erosió en els fons portuaris generada
per la propulsió dels bucs**

Autor/a

Jordi Domingo Feriche

Tutor/a

Francesc Xavier Gironella i Cobos

Departament

Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (EHMA)

Intensificació

Data

Octubre 2014

Índex

<u>LLISTAT DE TAULES</u>	<u>3</u>
<u>LLISTAT DE FIGURES</u>	<u>4</u>
<u>LLISTAT DE VARIABLES</u>	<u>5</u>
<u>1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS</u>	<u>7</u>
<u>2. PROBLEMÀTICA</u>	<u>8</u>
2.1 TIPUS D'ESTRUCTURES PORTUÀRIES	8
2.2 TIPUS DE PROTECCIONS	10
<u>3. ESTAT DE L'ART</u>	<u>16</u>
3.1 VELOCITATS GENERADES PER LES HÈLIXS	16
3.2 VELOCITAT DE CORRENT EN ELS FONS MARÍ	20
3.3 PROFUNDITAT DE SOSCAVACIÓ	21
3.4 CARACTERITZACIÓ DEL VAIXELL	22
<u>4. METODOLOGIA</u>	<u>25</u>
4.1 BATIMETRIES DISPONIBLES	26
4.2 FREQUÈNCIES DELS VAIXELLS, BUC CRÍTIC	32
4.3 BUC DE CàLCUL SEGONS LA ROM	38
4.4 AVALUACIÓ DE L'EROSIÓ A PARTIR DEL BUC DE CàLCUL	39
4.5 AVALUACIÓ DE L'EROSIÓ A PARTIR DEL BUC CRÍTIC	48
<u>5. RESULTATS I DISCUSSIONS</u>	<u>53</u>
<u>6. CONCLUSIONS</u>	<u>55</u>
<u>7. REFERÈNCIES</u>	<u>56</u>
<u>AGRAÏMENTS</u>	<u>57</u>

Llistat de taules

TAULA 1. PARÀMETRES REPRESENTATIUS DELS BUCS EN FUNCió DE LA SEVA TIPOLOGIA I CAPACITAT DE CÀRREGA (ROM 2.0-11).....	24
TAULA 2. DADES RELLEVANTS ESCOLLIDES DE VARIES FONTS D'INFORMACió DEL CRUISE BR..	37
TAULA 3. PARÀMETRES REPRESENTATIUS DELS BUCS EN FUNCió DE LA SEVA TIPOLOGIA I CAPACITAT DE CÀRREGA (ROM 2011)	38
TAULA 4. PARÀMETRES REPRESENTATIUS DELS BUCS DEFINITS COM A CREUER I FERRY EN COMPARACió AMB EL CRUISE BR (VERD, MÉS PROPER A LES DADES DEL CRUISE BR; VERMELL, MÉS ALLUNYAT)	39
TAULA 5. VALORS PER AL DISSENY DE LA FIGURA 21.....	41
TAULA 6. VALORS PER AL DISSENY DE LA FIGURA 22.....	42
TAULA 7. VALORS PER AL DISSENY DE LA FIGURA 23.....	44
TAULA 8. VELOCITAT CRÍTICA SEGONS EL TIPUS DE SOL (ROM, 2005)	46
TAULA 9. VALOR PER AL DISSENY DE LA FIGURA 24	47
TAULA 10. VALORS PER AL DISSENY DE LA FIGURA 25.....	48
TAULA 11. RESULTATS DE L'EROSió EN FUNCió DE LA VELOCITAT DE L'HÈLIX.....	52

Llistat de Figures

FIGURA 1. EROSIÓ BANQUETA (LEPIANI, 2011)	9
FIGURA 2. ESQUEMA MOLL PANTALLA (ROUBOS, 2006)	9
FIGURA 3. EROSIÓ LOCAL MOLL DE PLATAFORMA (LEPIANI, 2011)	10
FIGURA 4. PROTECCIÓ DEL TALÚS EN OBRES D'ATACAMENT OBERTES (PORT DESIGNER'S HANDBOOK, 2010)	11
FIGURA 5. PROTECCIÓ DEL PEU DEL TALÚS EN FRONT LA SOSCAVACIÓ (ROM, 2005)	12
FIGURA 6. PROTECCIÓ DE GABIONS AMB ESCULLERA (LEPIANI, 2011)	13
FIGURA 7. PROTECCIÓ DE GÀBIA DE GABIONS (LEPIANI, 2011)	13
FIGURA 8. MANTA DE GEOTÈXTIL (LEPIANI, 2011)	14
FIGURA 9. DEFINICIÓ DE COMPONENTS AXIALS DEL CAMP DE VELOCITATS DE CORRENT GENERADES PER LES HÈLIXS DELS BUCS (ROM, 2011)	17
FIGURA 10. SOSCAVACIÓ PRODUÏDA PER L'HÈLIX EN ESPAI NO CONFINAT (ROM, 2011)	18
FIGURA 11. SOSCAVACIÓ PRODUÏDA PER L'HÈLIX EN ESPAI CONFINAT (ROM, 2011)	20
FIGURA 12. EFECTE PRODUÏT PER LES CORRENTS GENERADES PER LES HÈLIXS EN EL FONS MARÍ (PORT DESIGNER'S HANDBOOK, 2010)	21
FIGURA 13. IMATGE DE LA PLANTA DE LA DÀRSENA DEL MORROT DEL PORT DE BARCELONA (GOOGLE MAPS)	25
FIGURA 14. EROSIÓ DE LA DÀRSENA A L'ANY 2007	27
FIGURA 15. EROSIÓ DE LA DÀRSENA A L'ANY 2008	28
FIGURA 16. EROSIÓ DE LA DÀRSENA A L'ANY 2009	29
FIGURA 17. EROSIÓ DE LA DÀRSENA A L'ANY 2010	30
FIGURA 18. EROSIÓ DE LA DÀRSENA A L'ANY 2011	31
FIGURA 19. EROSIÓ DE LA DÀRSENA A L'ANY 2013	32
FIGURA 20. BUC CRUISE BARCELONA DE GRIMALDI LINES	37
FIGURA 21. VELOCITAT DE L'HÈLIX EN FUNCIO DE LA POTÈNCIA EMPRADA	42
FIGURA 22. DISMINUCIÓ DE LA VELOCITAT DE L'HÈLIX DE POPA EN FUNCIO DE H_H	43
FIGURA 23. DISMINUCIÓ DE LA VELOCITAT DE L'HÈLIX TRANSVERSAL EN FUNCIO DE H_H	45
FIGURA 24. EROSIÓ MÀXIMA EN FUNCIO DE LA VELOCITAT DE L'HÈLIX DE POPA	47
FIGURA 25. EROSIÓ MÀXIMA EN FUNCIO DE LA VELOCITAT DE L'HÈLIX TRANSVERSAL	48

Llistat de variables

- a** : -1,0 per a hèlix simple i -0,28 per a hèlix doble (-).
- B** : màniga, és l'amplada més gran del buc (m).
- C** : alçada de l'eix de l'hèlix amb el fons marí (m).
- D_p** : diàmetre de la hèlix (m).
- D₀** : diàmetre inicial de raig , en metres. Pot considerar-se en el cas de hèlixs de tovera $D_0 = D_h$ (diàmetre de l'hèlix) y $0,71D_h$ per hèlixs obertes. Si és desconegut, s'estima (segons ROM 2.0-11) com el 70% del calat en condicions de desplaçament en llast (m).
- D_{0trans}** : diàmetre interior de la boca del túnel on estan instal·lades les hèlixs, en m. Si és desconegut, s'aplicarà $D_0 = 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot TPM + 1,5$ (m).
- D₅₀** : Mida mitja del sediment (m).
- E** : coeficient que depèn de la presència del timó, 0,71 per una hèlix amb timó centrat; 0,42 per dos hèlixs amb timó centrat al mig (-).
- F_T** : Factor de turbulència (-).
- F₀** : número de Froude (-).
- g** : gravetat (m/s^2).
- GT** : arqueig brut, és el volum o capacitat interior total de tots els espais tancats del buc (t).
- h_h** : distància vertical entre l'eix de l'hèlix i el fons marí (m).
- H_p** : alçada entre el eix de l'hèlix i el fons marí (m).
- l_h** : distància horitzontal entre la boca del túnel en el que estan instal·lades les hèlixs transversals i el paràmetre de l'obra d'atracament (m).
- L** : eslora, és la longitud màxim del casc del buc de proa a popa (m).
- L_{pp}** : eslora entre perpendiculars, és la distancia mesurada entre una perpendicular traçada per la intersecció de la flotació de proa, (en la condició de màxima càrrega, en aigua salada, l'estiu) i la mateixa perpendicular però a popa (m).
- max[V_{C, hèlixs/fons marí}]** : Màxima velocitat mitja axial en els fons marí.

$\max[V_{C, \text{hèlixtrans/fons marí}}]$: Màxima velocitat mitja axial en els fons marí.

P : potència utilitzada en el sistema de propulsió (W). Normalment, no es fa servir la totalitat de la potència instal·lada, així doncs en aquest cas d'estudi adoptarà un valor del 40% de la potència. Valors de la potència segons el tipus de buc es poden determinar d'acord amb l'apartat 3.3.1.3 de la ROM 3.1-99.

P_{htrans} : potència utilitzada en el sistema de propulsió de les hèlixs transversals (W). Normalment, es fa servir la totalitat de la potència instal·lada. A falta de dades més precises, s'estimarà amb la següent relació:

$$P_{\text{htrans}} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot \text{TPM}, \text{ adoptant com a mínim un potència de 750 kW.}$$

t : temps d'actuació de l'hèlix (s).

T : puntal, és l'alçada màxima del casc del buc des de la quilla fins la coberta principal (m).

TPM : tonatge de pes mort del buc (t).

V_b : velocitat en el fons marí produïda per l'hèlix (m/s).

V_r : velocitat relativa entre el buc i l'aigua (nusos)

V_0 : velocitat inicial de sortida de l'hèlix (m/s).

W_0 : Potència del buc model semblant (CV).

Δ : Desplaçament del buc (t).

Δ_{PC} : desplaçament màxim o a plena càrrega, és el pes total del buc carregat amb la màxima càrrega permesa (t).

$\varepsilon_{\text{màx}}$: soscavació màxima (m)

ρ : densitat de l'aigua (ton/m^3)

ρ_s : densitat del sòlid (ton/m^3)

ρ_w : densitat de l'aigua (kg/m^3)

1. Introducció i objectius

El transport marítim, tant de mercaderies com comercial, ha anat incrementant en volum any rere any. Això implica un increment en les dimensions dels bucs creant la necessitat de tenir més potència en els seus motors així com la introducció de les hèlix de proa per facilitar les maniobres.

Aquesta nova situació, amb nous vaixells, amb nous mètodes de propulsió i, la falta d'adaptació dels ports pot provocar una erosió considerable en el fons dels ports que, alhora, genera averies i fins i tot el col·lapse de les estructures portuàries adjacents.

El present estudi, abordarà aquesta problemàtica analitzant l'origen, les causes i les conseqüències del moviment del sol del fons marí portuari.

Una vegada vist l'origen, les causes i les conseqüències, s'anomenaran algunes de les possibles solucions als danys ocasionats a les estructures portuàries generats per la erosió i els possibles sistemes de protecció per evitar aquests danys.

L'objectiu principal és discutir les metodologies a seguir segons diferents fonts per poder analitzar les velocitats de corrent generades per les hèlixs dels bucs, i posteriorment, la profunditat produïda per l'erosió deguda a les velocitats de les hèlixs.

Per reforçar aquesta discussió, s'aplicaran dades sobre un cas real. Aquest cas es centrarà en una dàrsena del port de Barcelona (dàrsena del Morrot), en la qual, durant un període de 5 anys s'analitzarà l'evolució de l'erosió del fons marí de la mateixa (anàlisi batimètric) i s'analitzaran els centenars de bucs que han fet maniobres per atracar i desatracar dins de la dàrsena.

L'estudi es centrarà en les maniobres del vaixell més crític, el que per les seves característiques i maniobres, més erosió provoca al fons marí.

En resum, els objectius de l'estudi són:

- Descriure els problemes generats i les solucions per combatre'ls.
- Exposar les eines de l'estat de l'art per avaluar l'erosió provocada per les hèlixs.
- Analitzar les eines d'anàlisi disponibles segons la metodologia emprada en aquest treball.
- Obtenir una crítica sobre les eines d'anàlisi disponibles.

2. Problemàtica

La problemàtica es resumeix en l'efecte produït per les forces erosives degudes, principalment, a les corrents d'aigua generades per la propulsió dels vaixells. Aquestes posen en moviment partícules del fons marí en les proximitats de les estructures d'atracament provocant soscavació en alguns casos i, reducció de calat en altres.

La soscavació en l'entorn de les estructures pot afectar a la seva estabilitat parcial o totalment. També es poden produir parades operatives degut a la reducció del calat del port a la zona d'atracaments com a conseqüència de l'aparició de zones de dipòsit de material remogut.

Evidentment, aquestes parades operatives tenen unes conseqüències econòmiques. Siguin degudes a la parada de les activitats portuàries portades a terme, o a les reparacions portades a terme per solucionar la problemàtica.

Hi ha publicacions que demostren la implicació que tenen els mètodes de propulsió dels bucs en les estructures portuàries. Alguns exemples són el del Port de Larne a Irlanda del Nord (Hamill, 1988) o el del Port d'Amsterdam-Rijnkanaal als Països Baixos (Schokking, 2002).

A continuació es descriurà quins efectes provoca aquesta problemàtica sobre diferents tipus d'estructures portuàries.

2.1 Tipus d'estructures portuàries

Hi ha diferents tipus d'estructures portuàries, les tancades, on tenim els molls en bloc i els molls en pantalla i, les obertes.

Les tancades en bloc són estructures de protecció de paràmetre vertical que es componen de fileres de blocs un sobre l'altre, i tots, sobre un bloc principal base (Figura 1). El bloc principal està recolzat sobre una banqueteta, just la part de la estructura més susceptible on es podria produir el col·lapse ja que és la part que per l'erosió del fons proper pot lliscar o ser erosionat directament i provocar que els blocs superiors bolquin.

També es poden considerar altres averies degudes a les corrents generades per les hèlixs, que afectarien directament als blocs provocant una erosió i una posterior filtració de material. La pèrdua d'aquest material provoca l'aparició d'esquerdes i enfonsaments en la pavimentació propera al cantil del moll.

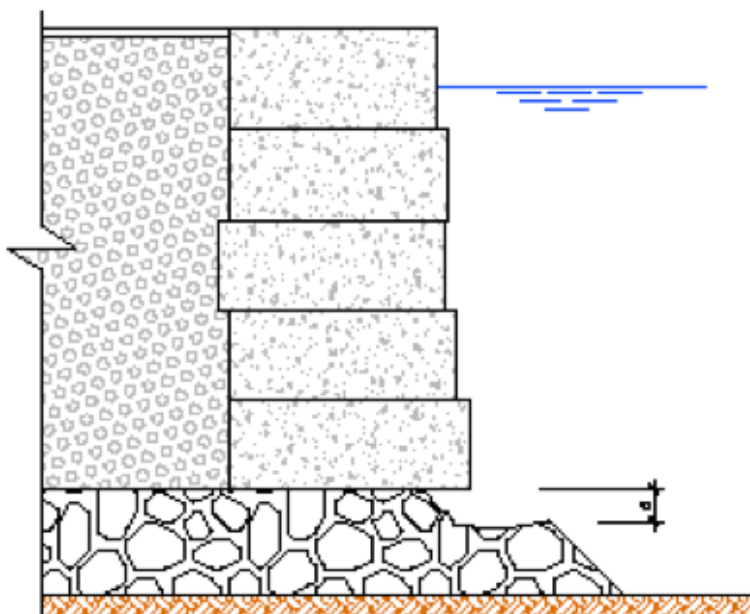


Figura 1. Erosió banqueta (Lepiani, 2011)

Els molls pantalla també són estructures portuàries tancades però, a diferència dels anteriors es tracta només d'una única superfície contínua de protecció (Figura 2). Aquests, basen el seu equilibri en la força del terreny. Si es genera una reducció del material degut a l'erosió es perdrà l'equilibri i començaran a aparèixer esquerdes fins que el moll col·lapsi.

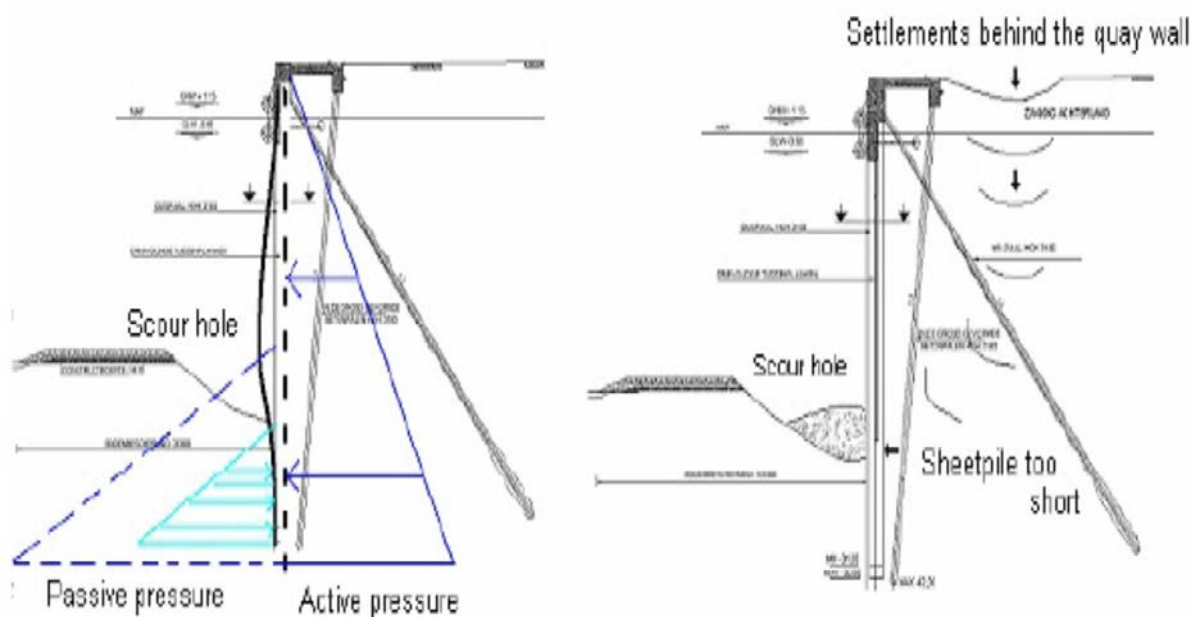


Figura 2. Esquema moll pantalla (Roubos, 2006)

Els molls de plataforma són els que fan referència a les estructures de tipus obert. En aquestes estructures la plataforma es recolza sobre uns pilons que fan de base i estan introduïts dins el fons marí (Figura 3). Lògicament, la resistència del moll es basa en la fricció que hi ha entre el terreny del fons marí i els pilons. El col·lapse de l'estructura, doncs, serà degut al desplaçament del talús o a la pèrdua de terreny que suporta els pilons. En el primer cas afectarà a tota la estructura i en el segon afectarà només parcialment (als pilons afectats).



Figura 3. Erosió local moll de plataforma (Lepiani, 2011)

2.2 Tipus de proteccions

Una vegada aparegut el problema es preveuen una sèrie de solucions. De cara a la planificació de les mesures de protecció és important definir un escenari de càlcul a partir dels principals factors que poden condicionar aquest fenomen ja que, depenent de quin escenari es tingui, s'utilitzaran mesures de protecció diferents. A continuació s'enumeren els principals factors:

- Tipologia de l'obra d'atracament
- Profunditat i pendent del fons marí
- Tipus de sediment del fons marí
- Característiques del buc de disseny: dimensions, potència instal·lada, posició de les hèlixs, velocitats de les hèlixs, tipus de hèlixs.
- Freqüència de les operacions d'atracament
- Angle d'atracament
- Condicions climàtiques límit d'operativitat establertes per operacions d'atracament
- Nivell de l'aigua de disseny

- Estat de càrrega del buc

Els mantells d'escullera constitueixen la mesura més habitual per protegir una zona amb perill de soscavació en l'entorn de les obres d'atracament, tot i que, també existeixen mètodes alternatius descrits més endavant.

El disseny dels mantells de protecció es basen en una capa de protecció en front la soscavació, la qual es disposarà sobre el àrea del fons marí (talús) exposada a les elevades velocitats de corrent generades per les hèlixs. En el cas de molls de paràmetre vertical, la protecció s'estendrà sobre el fons marí en la línia d'atracament. Evidentment, la longitud a protegir dependrà de la posició i la mida dels bucs que atraquen al moll.

En el cas de les obres d'atracament obertes, s'ha de disposar la protecció sobre el talús existent sota la plataforma, estenent-se sobre el fons marí al peu del mateix sota la línia d'atracament, tal i com es mostra a la Figura 4.

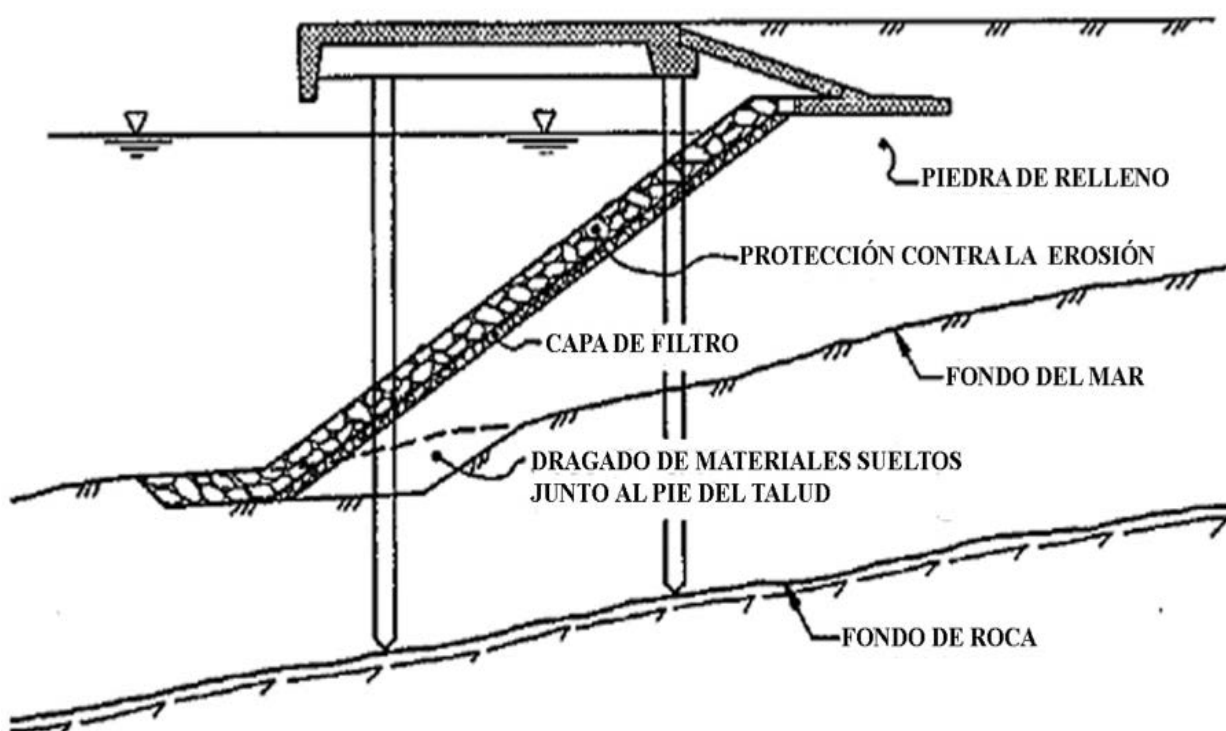


Figura 4. Protecció del talús en obres d'atracament obertes (Port designer's handbook, 2010)

La Figura 5 mostra la configuració de la protecció al peu del talús.

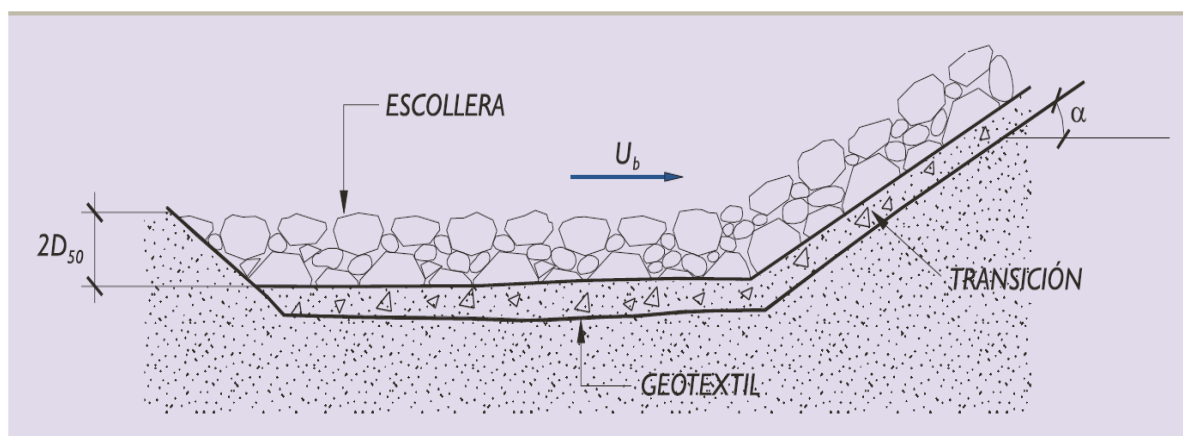


Figura 5. Protecció del peu del talús en front la socavació (ROM, 2005)

Hi ha altres tipus d'actuacions que es poden contemplar:

- Injecció de formigó sobre la capa d'escullera: s'aconsegueix una major efectivitat
- Lloses de formigó: permeten ajustar l'espessor de protecció necessari i constitueix un sistema més resistent, tot i que més costós
- Sistemes flexibles constituïts per matalassos de material sintètic omplerts amb formigó
 - Es poden disposar sobre el fons marí o sobre talussos
 - Les peces es col·loquen cobrint una àrea determinada, unides entre si i omplertes amb formigó
 - Matalassos fabricats a base de fibres sintètiques d'alta resistència, els quals s'omplen amb formigó per donar-los una certa consistència
- Gabions

Són estructures en forma de malla de filferro omplerts amb material granular (Figura 6).

Els principals inconvenients són la possibilitat de la corrosió de la malla de filferro i la facilitat de ruptura d'aquest amb els moviments de la malla, donant lloc ocasionalment a la posterior pèrdua del material de reblert.



Figura 6. Protecció de gabions amb escullera (Lepiani, 2011)



Figura 7. Protecció de gàbia de gabions (Lepiani, 2011)

- Mantes de geotèxtil

Aquest tipus de protecció es basa en teles teixides a base de multifilaments de fibres sintètiques d'alta resistència (Figura 8). Aquest teixit especial és semipermeable a l'aire i a l'aigua, però reté el ciment ja que posteriorment són reomplertes amb un micro formigó d'àrid molt fi.

La seva resistència mecànica és suficient per suportar les pressions que es produeixen en el moment en el que s'omple la manta. El geotèxtil omplert funciona com una manta continua d'elevat pes que, donada la seva elevada superfície de contacte, oposa una elevada força de fricció a l'inici del moviment.

El matalàs s'ha d'assentar en una superfície regular i plana. Primer es presenta el matalàs en la zona submergida a protegir i s'assegura amb piques, per evitar qualsevol moviment. Un cop situat en el fons marí es realitza el seu ompliment.



Figura 8. Manta de geotèxtil (Lepiani, 2011)

Aquests tipus de mesura no són estructurals i si s'apliquessin de manera correcta moltes de les mesures estructurals no serien necessàries en certes obres d'atrancament.

L'objectiu d'aquestes mesures és evitar que les velocitats de flux de les hèlixs no arribin a les velocitats crítiques que generen l'erosió del fons marí.

Això només és possible si es redueix el temps d'actuació de les hèlixs així com les velocitats de corrent generades per les hèlixs, cosa que significa disminuir la potència.

És evident que en un cas utòpic només es farien servir les mesures de caire operatiu i no les de caire estructural per evitar l'erosió produïda per les hèlixs, però en un cas real s'utilitzen totes dues de forma complementària.

Aquestes mesures haurien d'ésser les principals mesures utilitzades de cara a evitar la soscavació en les zones d'atracament. Evitarien el cost de l'aplicació de les mesures estructurals i a més reduirien el cost de carburant degut a la disminució de temps i velocitat emprades pels bucs, a l'hora de fer les maniobres d'atracament. Tot i això, avui en dia s'utilitzen en obres ja construïdes on s'ha vist incrementat l'efecte de les corrents generades per les hèlixs com a conseqüència del desenvolupament dels sistemes de maniobra, com les hèlixs transversals i motors amb potències més elevades per a bucs de major mida.

A continuació presentem les mesures més destacades de tipus operatiu:

- Ús de remolcadors per a la realització de les maniobres en certes casuístiques:
 - Atracaments amb freqüent exposició a hèlixs transversals (fèrries, portacontenidors)
 - Resguards sota quilla excessivament petits
 - Atracament de bucs amb càrrega elevada per sobre d'un cert llindar
 - Bucs amb sistemes de propulsió en els que s'esperin efectes desfavorables
 - Vents de gran intensitat en situacions de bucs amb poca càrrega
- Comunicacions periòdiques amb pilots i operadors de bucs amb l'objectiu de comprovar que són conscients de la problemàtica de soscavació per efecte de les hèlixs
- Implementar sistemes de senyalització, cridant l'atenció sobre l'efecte desfavorable del ús de les hèlixs transversals
- Instal·lació de sirenes o llums llampegants, programades per accionar-se sempre que les velocitats de les corrents generades superessin un cert llindar al ésser detectades a través d'un sensor de flux o de corrent

El que es tracta en el disseny és de preveure. Per aquest motiu s'avaluaran les eines disponibles per tal de conèixer la seva aplicabilitat.

3. Estat de l'art

En aquest apartat s'introduiran una sèrie de passos per poder aconseguir una guia a l'hora de preveure els danys que produeixen els vaixells.

Existeix, en el món de l'enginyeria portuària, les Recomanacions d'Obres Marítimes (ROM). Un document que recull una sèrie de normes i recomanacions de cara a la projecció, anàlisi i construcció d'estructures portuàries.

Primer de tot, s'analitzarà com trobar les velocitats generades per les hèlixs dels bucs. Posteriorment es descriurà quina és l'erosió provocada per aquestes velocitats. Finalment, es descriurà com caracteritzar el buc per aconseguir les dades necessàries per trobar la velocitat i erosió provocada pel mateix buc.

3.1 Velocitats generades per les hèlixs

Segons la ROM aquests corrents generats per les hèlixs estan associades amb el camp de velocitats de flux generades per les mateixes en les maniobres d'atracament i desatracament dels bucs.

Les velocitats d'aquests corrents s'han de prendre en consideració a l'hora de verificar l'erosió o soscavació dels fons marins en les zones d'atracament ja que són l'agent predominant d'aquestes mateixes accions.

El camp de velocitats del flux generat per les hèlixs en un espai no confinat es pot dividir en dos zones: una inicial d'establiment del flux i una altra on el flux es considera estabilitzat (Figura 9). L'última és la variable que es considera que defineix aquest tipus d'accions. En aquest camp de velocitats es consideren predominants els perfils de velocitats de corrent horitzontals continguts en el pla vertical que conté l'eix de l'hèlix. Aquest perfils de velocitats defineixen les components axials de la velocitat de corrent. Les velocitats radials i tangencials són menyspreables en comparació a les axials.

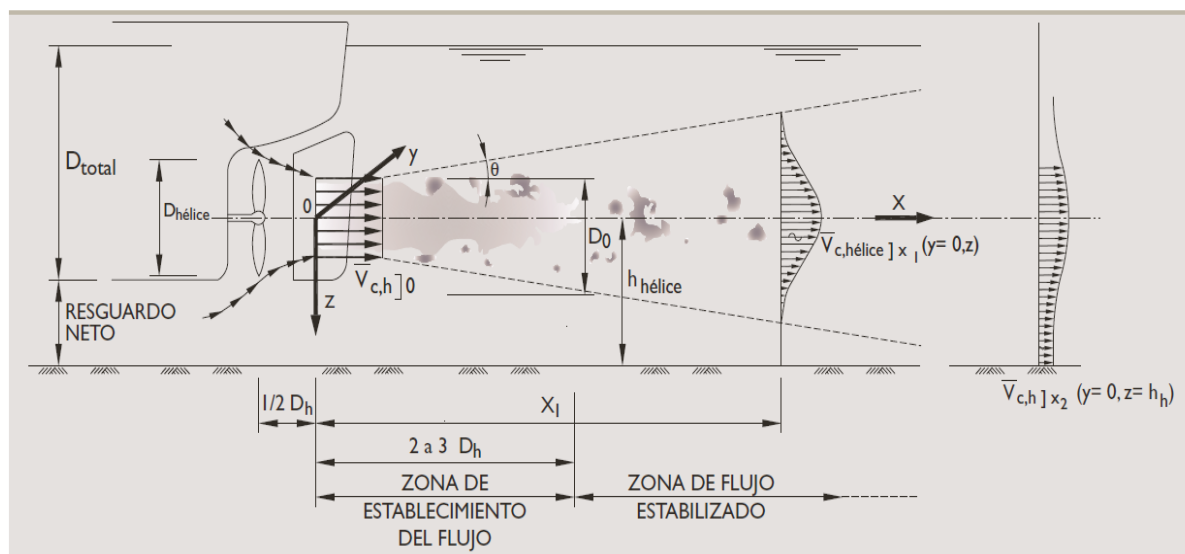


Figura 9. Definició de components axials del camp de velocitats de corrent generades per les hèlixs dels bucs (ROM, 2011)

És important remarcar que les condicions de contorn, com per exemple la presència de obres d'atracament o d'altres bucs, alteraren aquest camp de velocitats. També cal tenir en consideració els agents climàtics i altres agents induïts per bucs navegant.

De cara a la verificació de l'erosió, soscavació i acumulació en les proximitats de les obres d'atracament es defineix la màxima velocitat horitzontal de la corrent en el fons marí en el pla vertical que conté l'eix de l'hèlix [$\max V_{C,hèlix}(y=0, z=h_{hèlix})$] (veure sistema de referència en la Figura 9).

3.1.1 Velocitat de l'hèlix en espai no confinat

La ROM 2.0-11 recull les següents expressions aplicades a una hèlix de popa. En aquesta tesina es considera que és aplicable indistintament a una hèlix de popa o proa (transversal) sempre que estiguin en un espai no confinat.

Així doncs:

$$[\max V_{C,hèlix}(y=0, z=h_{hèlix})] = F_T \cdot \max [V_{C,hèlix} / \text{fons marí}]$$

On:

$$\max [V_{C,hèlix} / \text{fons marí}] = C_1 \cdot C_2 \cdot V_{C,h/0} \cdot (D_0/h_h)$$

On:

C_1 : factor de confinament de flux per defecte del fons marí. Es pot adoptar 0.4 com a valor usual, segons mesuraments experimentals.

C_2 : factor de confinament de flux per obra d'atracament. Adoptarem 1.1 si l'atracament és lateral i 1.2 si es per popa.

I la velocitat de raig $V_{c,h/0}$ en el origen ($x = 0, z = 0$) en m/s, pot adoptar-se com:

$$V_{c,h/0} = 1,17 \cdot \sqrt[3]{P / \rho_{\omega} \cdot D_0^2}$$

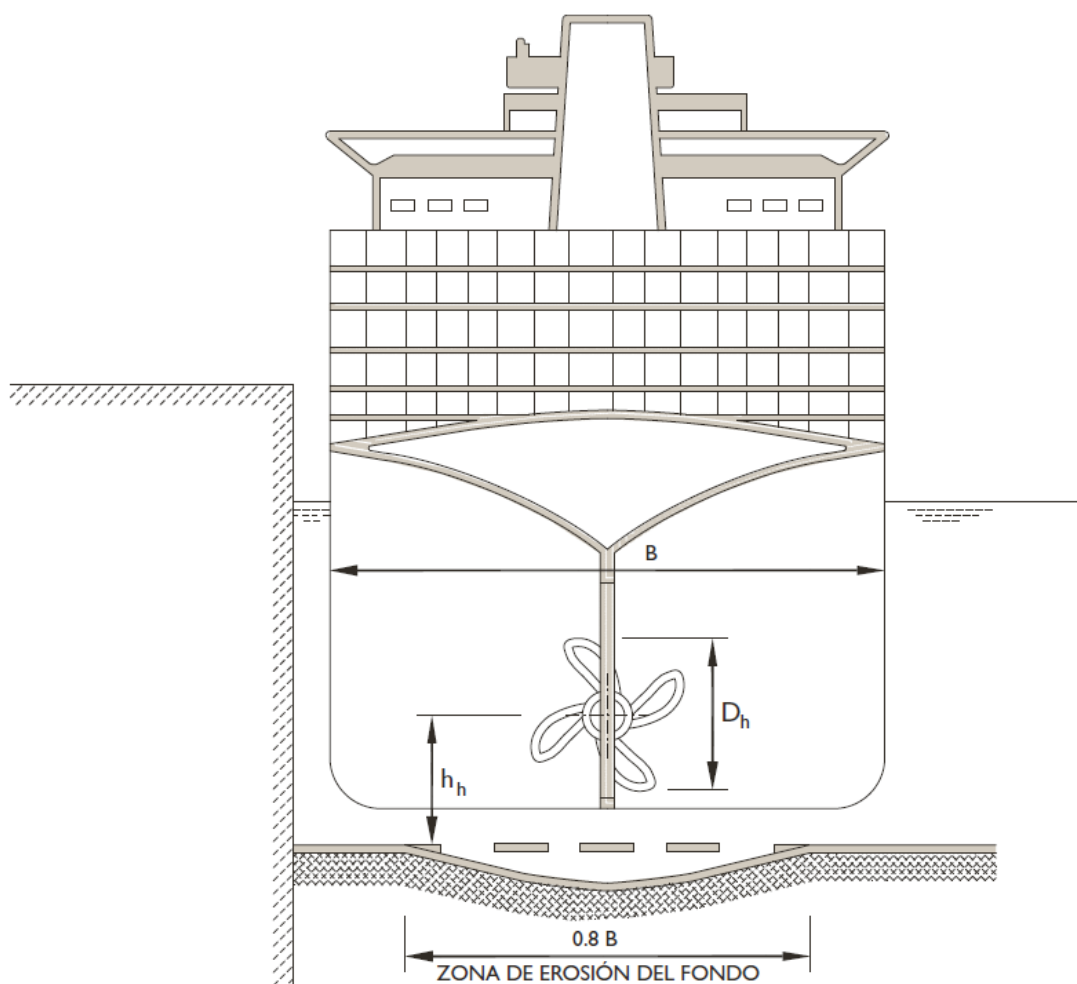


Figura 10. Soscavació produïda per l'hèlix en espai no confinat (ROM, 2011)

Segons la ROM 2.0-11, a peu de pàgina de la seva taula 4.6.4.45 es cita el següent: “Donat que la distància entre eixos en el cas de hèlixs múltiples està entre una i dues vegades el diàmetre d'aquestes, pot considerar-se que l'anterior aproximació és aplicable per cada una de les hèlixs fins a una distància d'aproximadament $10 D_0$. Per tant, independentment del número d'hèlixs, la zona en la que es produeix la màxima corrent és la mateixa, tot i que l'amplada en el fons marí afectada serà lògicament major. Per distàncies més grans pot considerar-se que la distribució de velocitats seria equivalent a la produïda per una única hèlix de major mida, podent admetre's que la zona afectada per el raig te el doble de amplada que la deguda a una única hèlix”.

3.1.2 Velocitat de l'hèlix en un espai confinat

La ROM 2.0-11 recull les següents expressions aplicades a una hèlix transversal de proa. En aquesta tesina es considera que és aplicable indistintament a una hèlix de popa o proa (transversal) sempre que estiguin en un espai confinat.

Així doncs:

$$[\max V_{C,hèlixs\ trans}(y = 0, z = h_{hèlix})] = F_T \cdot \max [V_{C\ hèlix\ trans / fons\ marí}]$$

On:

$$\max [V_{C\ hèlix\ trans / fons\ marí}] = C_3 \cdot V_{C,htrans,h/0} \cdot (D_{0trans} / h_h + l_h),$$

$$\text{per } l_h / h_h \geq 1,8.$$

On:

C_3 : factor de confinament de flux per defecte del fons marí. Es pot adoptar 2.8 com a valor usual, quan l'eix de l'hèlix és perpendicular a la línia d'atrancament.

I la velocitat de raig $V_{C,htrans,h/0}$ a la boca del túnel on estan instal·lades les hèlixs en l'origen ($x = 0, z = 0$) en m/s, pot adoptar-se com:

$$V_{C,Hèlix\ trans,h/0} = 1,17 \cdot \sqrt[3]{P_{Hèlix\ trans} / \rho_\omega \cdot D_{0trans}^2}$$

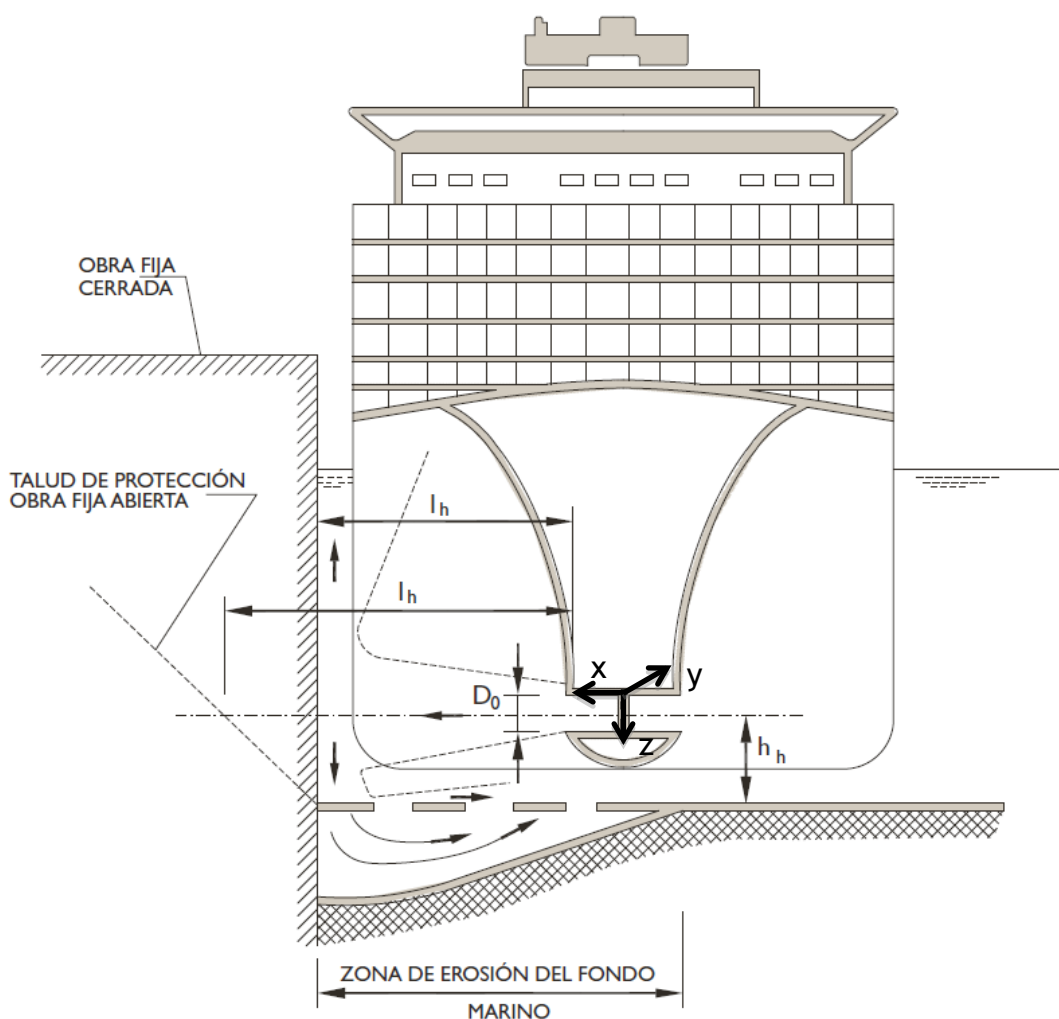


Figura 11. Soscavació produïda per l'hèlix en espai confinat (ROM, 2011)

3.2 Velocitat de corrent en els fons marí

És evident que la velocitat de corrent de sortida de l'hèlix no és la mateixa que la produïda al fons marí. A partir de la velocitat de sortida i coneixent l'alçada de l'hèlix respecte el fons marí es pot conèixer la velocitat a les proximitats del fons marí (Figura 12). Segons Recommendations of the Committee for Waterfront Structures: Harbours and Waterways (EAU-2004):

$$V_b = V_0 \cdot E \cdot \left(\frac{H_p}{D_p} \right)^a$$

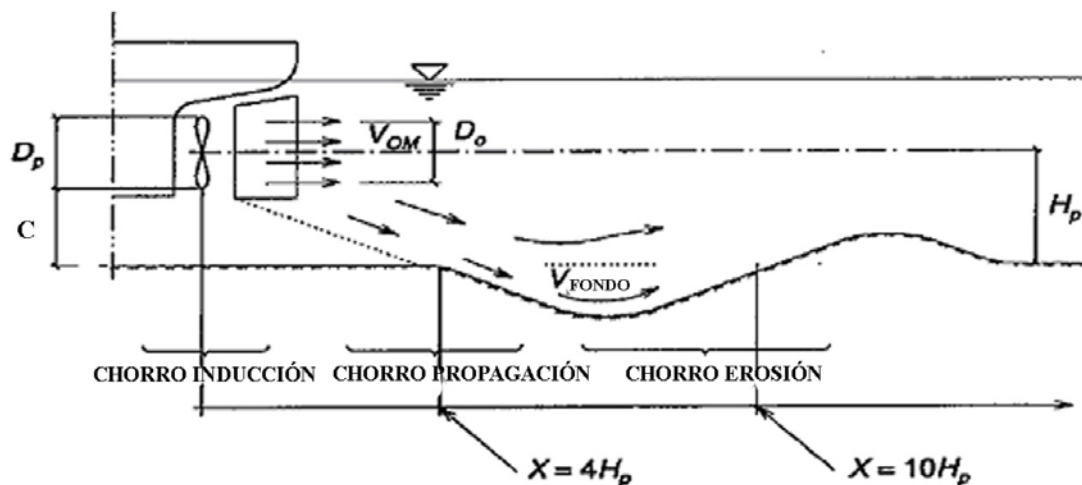


Figura 12. Efecte produït per les corrents generades per les hèlixs en el fons marí (Port designer's handbook, 2010)

3.3 Profunditat de soscavació

Com s'ha anat explicant en els apartats anteriors, la soscavació es produeix degut a unes corrents generades per les hèlixs dels bucs a l'hora d'atracar i desatracar dins dels ports. Aquestes corrents generades per les hèlixs provoquen erosió al fons marí.

La soscavació anirà progressant fins arribar a una profunditat en la que la velocitat de les corrents del fons marí generades per les hèlixs dels bucs serà inferior a la velocitat crítica i, per tant, la soscavació haurà arribat al seu punt màxim pel que fa a les hèlixs del bucs.

Segons la ROM 0.5-05 per a mides de sediment $0.1 < D_{50} < 0.3$ m, es pot estimar la profunditat màxima de soscavació en funció dels principals paràmetres que condicionen l'erosió:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{F_0}{H_p / D_p} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

On:

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{g \cdot D_{50} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}}$$

Per tant:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{V_0}{\sqrt{g \cdot D_{50} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}}}{H_p / D_p} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

A part de les ROM, hi ha altres estudis que també descriuen altres eines per poder calcular l'erosió del fons marí provocades per les velocitats generades per les hèlixs dels bucs.

Hamill (1988) va fer uns assaigs sobre la problemàtica de la soscavació, i basant-se en aquests va proposar una metodologia per estimar la profunditat de la erosió en funció del temps d'actuació de l'hèlix.

Aquesta metodologia, com l'anterior proposada per la ROM, també és per a sols amb sediments granulars mitjans o grossos.

Segons Hamill:

$$\epsilon_{m\grave{a}x} = \Omega [Ln(t)]^\Gamma$$

Els dos coeficients experimentals, Ω i Γ , els defineix Hamill (1988) a partir d'un anàlisi de regressió dels resultats dels assaigs, i s'obtenen les següents relacions:

$$\Gamma = 4.1135 \cdot \left(\frac{C}{D_{50}} \right)^{0.742} \cdot \left(\frac{D_p}{D_{50}} \right)^{-0.522} \cdot F_0^{-0.682}$$

$$\Omega = 45,05 \cdot \Gamma^{-6,98}$$

3.4 Caracterització del vaixell

Segons la ROM 2.0-11 per poder caracteritzar qualsevol buc, s'haurà de tenir en compte una sèrie de paràmetres:

- Tipologia de buc segons el què transporta (passatgers o mercaderia).
- Paràmetres geomètrics (eslora, calat, màniga, etc.).
- Paràmetres relacionats amb la capacitat de càrrega.

- Característiques de maniobra i operativitat nàutica a l'hora d'atracar i de desatracar.
- Velocitat màxima de servei a l'àrea de navegació considerada.

Aquests paràmetres, evidentment, venen especificats en detall a la mateixa ROM 2.0-11.

Tot això, és necessari per poder avaluar el principals efectes hidrodinàmics induïts pel buc d'estudi a l'hora de fer les maniobres d'atracament i amarrar el vaixell al moll. Alguns d'aquests efectes hidrodinàmics són els corrents de retorn, els descens dels nivells d'aigua i les ones generades pel moviment dels bucs en trànsit que es propaguen fins les obres portuàries. És important analitzar aquests efectes quan el buc està atracant i quan el buc està amarrat (que no en repòs), ja que poden modificar els esforços sobre les estructures, així com erosions externes de tipus divers.

Cal tenir en compte, també, l'efecte "buc-buc". Això és l'efecte que produeix un buc que navega en les proximitats d'un altre buc amarrat generant unes forces horitzontals de succió i rebuig entre els dos bucs causades per les asimetries de fluxos d'aigua que resulten al voltant dels cascs dels bucs.

Per determinar el tipus de buc, la ROM estableix una taula segons els paràmetres representatius del buc en funció de la seva tipologia i capacitat de càrrega (Taula 1).

Taula 1. Paràmetres representatius dels bucs en funció de la seva tipologia i capacitat de càrrega
(ROM 2.0-11)

TIPO DE BUQUE	CLASE	GT	Δ_{PC} (t)	L (m)	L _{pp} (m)	B (m)	T (m)
FERRIES	FERRIES CONVENCIONALES (Ro-Ro, Ro-Pax and Cruise Ferries)	50.000	82.500	309	291	42,6	21,4
		40.000	66.800	281	264	39,9	19,7
		30.000	50.300	253	237	37,2	18,0
		20.000	33.800	219	204	33,6	15,9
		15.000	25.500	197	184	31,3	14,5
		10.000	17.100	170	158	28,3	12,8
		7.000	12.100	150	139	25,9	11,5
		5.000	8.690	133	122	23,8	10,4
		3.000	5.260	110	101	20,9	8,8
		2.000	3.540	95	87	18,9	7,8
		1.000	1.790	74	68	15,9	6,3
	FERRIES RÁPIDOS MULTICASCO (Multihull Fast Ferries)	9.000	3.100	127	117	30,5	8,3
		6.000	2.100	107	93	26,5	9,5
		5.000	1.700	97	83	24,7	7,8
		4.000	1.400	92	79	24,0	7,3
		2.000	700	85	77	21,2	6,5
		1.000	350	65	62	16,7	6,2
		500	175	46	41	12,3	4,0
		250	96	42	37	11,6	4,3
TIPO DE BUQUE	CLASE	GT	Δ_{PC} (t)	L (m)	L _{pp} (m)	B (m)	T (m)
CRUCEROS (Cruise Ships)	6.300 ²⁷⁾	225.000	110.000	362	326	47,0	24,8
	4.500	155.000	77.000	350	315	39,0	23,8
	4.000	145.000	72.000	340	306	38,9	23,5
	3.000	140.000	70.000	325	293	38,6	22,7
	2.500	120.000	65.700	294	265	35,5	22,5
	2.000	95.000	47.500	272	245	35,0	22,0
	1.500	70.000	39.700	263	237	32,2	21,3
	1.000	50.000	29.200	235	200	32,2	20,9
	800	35.000	21.000	192	175	29,8	19,7
	500	30.000	18.000	173	159	27,7	17,6
	250	20.000	12.000	151	139	25,1	15,1
	200	15.000	9.000	133	124	22,9	13,2
	175	10.000	6.000	119	111	21,1	11,6
	150	6.000	3.600	99	94	18,6	9,6
	–	4.000	2.400	86	82	16,7	8,2
	–	2.000	1.200	68	65	14,1	6,3

4. Metodologia

Per tal d'analitzar les eines disponibles descrites al capítol 3, i extreure unes conclusions, la metodologia de treball es basarà en contrastar dades d'un cas pràctic. Per una banda, es coneix l'erosió generada i, per l'altra, es determinarà quin és el vaixell més crític.

Conegut el vaixell, s'aplicaran les diferents formulacions disponibles aplicant dades genèriques de vaixells tipus (ROM) i aplicant dades concretes del vaixell crític. Els resultats avaluats i l'aplicació de les formulacions i dades disponibles permetran contrastar la realitat amb l'esperat.

L'estudi es centrarà en una de les dàrsenes del Port de Barcelona, la dàrsena del Morrot (Figura 13). S'analitzaran quins són els bucs que maniobren i atraquen dins la mateixa, per tal de determinar el buc o bucs més crítics.

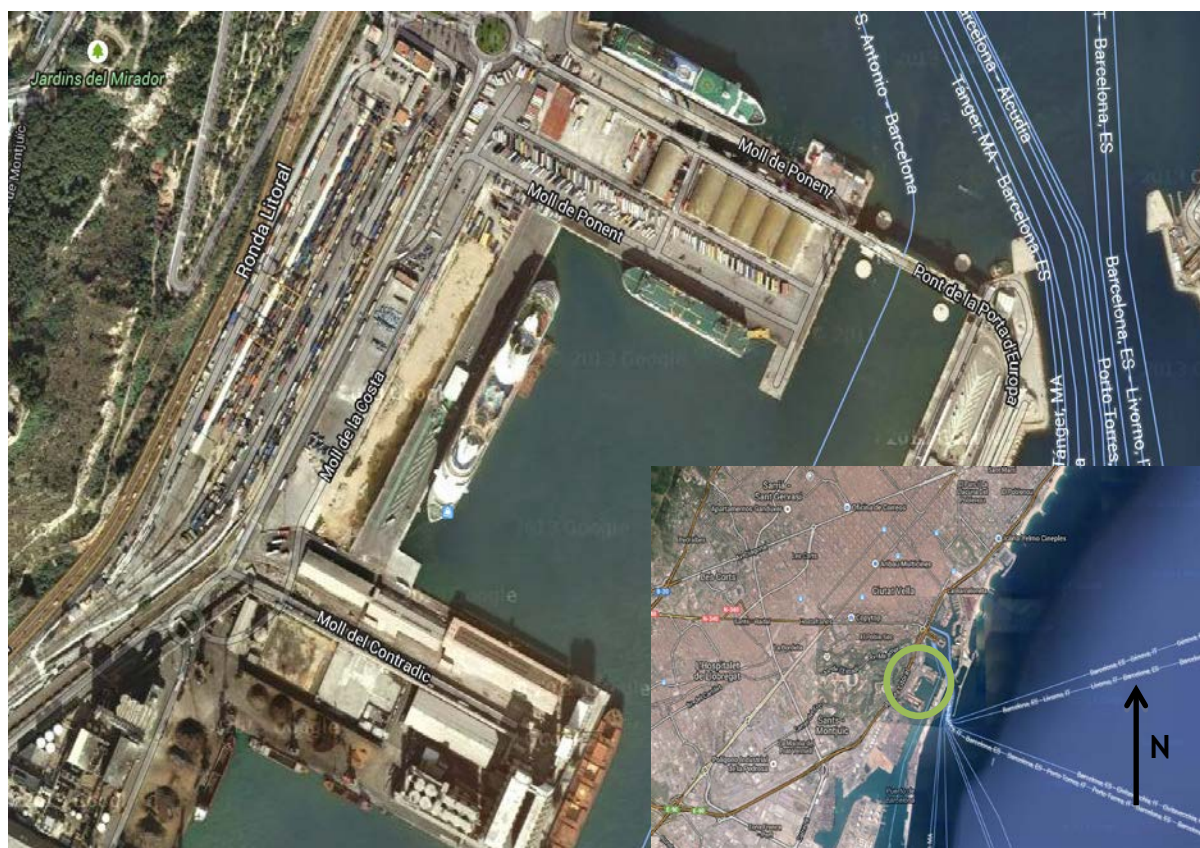


Figura 13. Imatge de la planta de la dàrsena del Morrot del Port de Barcelona (GoogleMaps)

El fons marí de la dàrsena serà analitzat durant un període de 5 anys (2007-2011). Durant aquest període de temps es veurà l'evolució de l'erosió, tant soscavació com sedimentació. Clarament es veuran unes zones més afectades i unes altres menys degut a la alta freqüència de certes maniobres d'atrancament d'uns bucs en particular.

La dàrsena està formada per 3 molls, el 20D o moll Ponent (sud), el moll 21A o moll Costa i el moll 22A, el qual no tindrà gaire rellevància en l'estudi com veurem més endavant. Dos d'ells, el 20D i el 22A tenen 6 mòduls i el 21A en té 8.

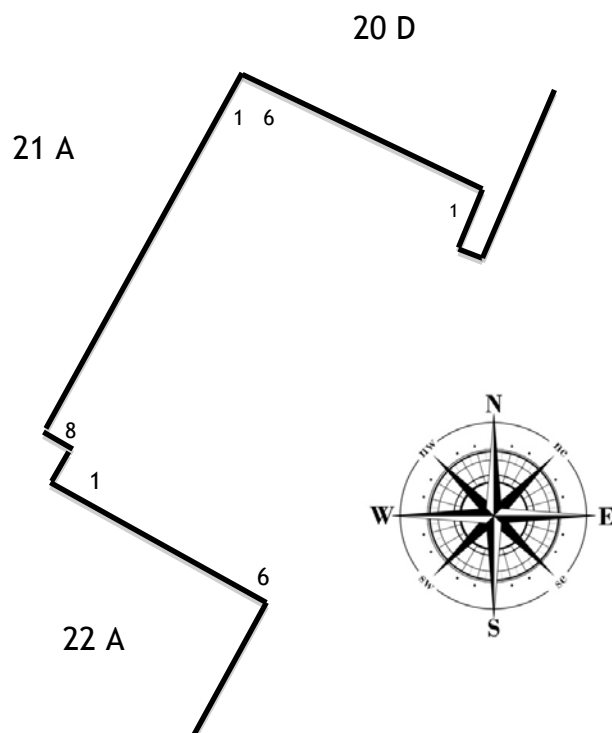


Figura 13. Esquema de la planta de la dàrsena del Morrot del Port de Barcelona

4.1 Batimetries disponibles

Com s'ha comentat en l'apartat anterior, durant un període de 5 anys s'ha estudiat l'erosió de la dàrsena. A continuació es mostren una sèrie d'imatges en les que es pot veure l'evolució batimètrica durant aquest període.

- **Any 2007**

Com es pot apreciar a la Figura 14, a l'any 2007 la dàrsena tenia un calat aproximat de uns 12 metres. Tot i que si a la part exterior de la dàrsena hi ha en alguns punts fins uns 18 o 19 metres de soscavació, però aquest estudi només es centrarà en el fons marí dintre de la dàrsena delimitades pel mòdul 6 del moll 22A i pel mòdul 1 del moll 20D.

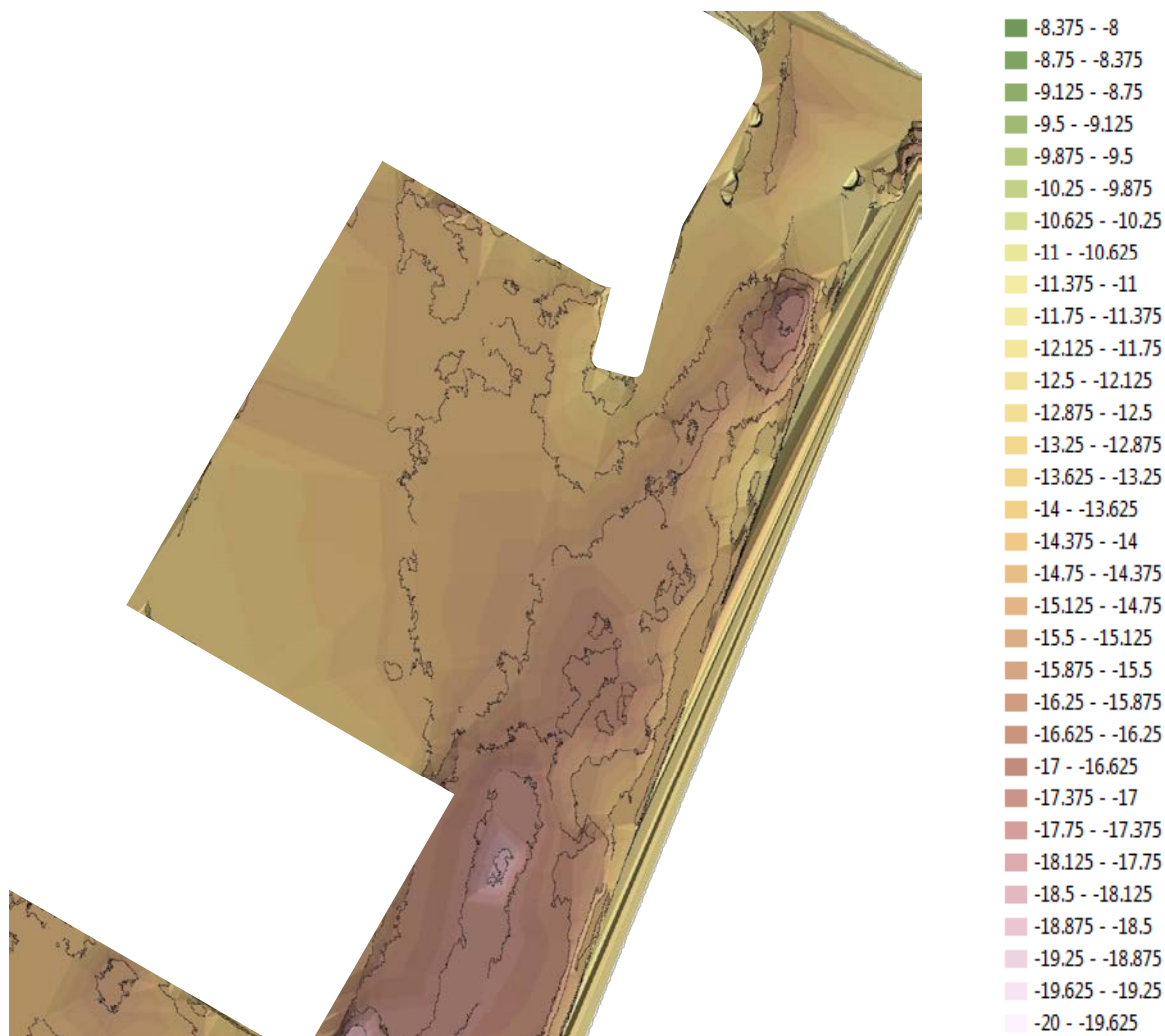


Figura 14. Erosió de la dàrsena a l'any 2007

- Any 2008

A l'any 2008 just a la cantonada dels molls 21A i 20D (mòdul 1 i 6 de cada moll respectivament) es comença a diferenciar una erosió més marcada respecte la resta del fons marí de la dàrsena que segueix al voltant dels 12 o ara inclús 13 metres de calat. La cantonada, per contra, ja comença a arribar als 16 metres de profunditat (Figura 15).

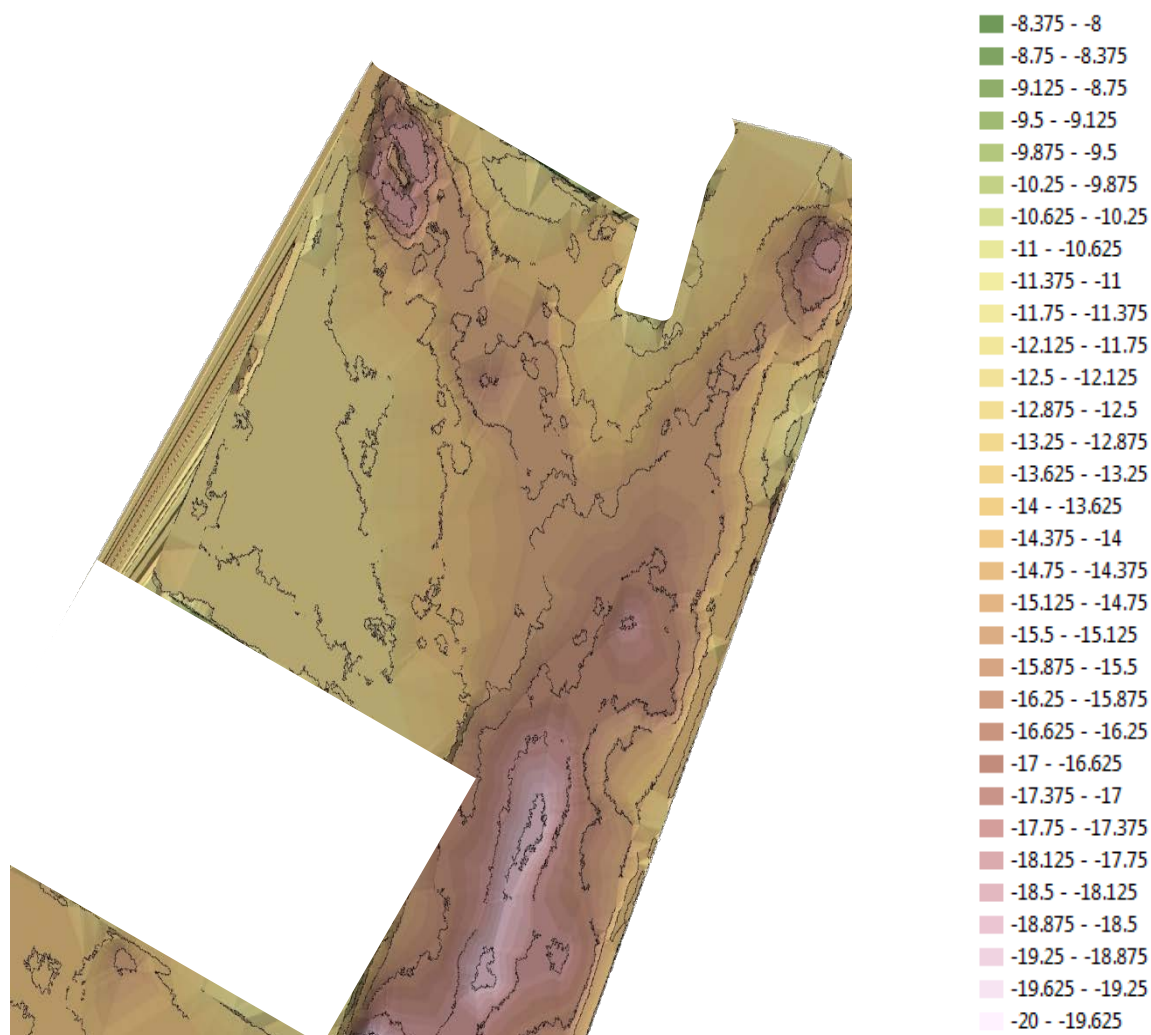


Figura 15. Erosió de la dàrsena a l'any 2008

- Any 2009

Respecte l'any anterior, el 2008, l'evolució més clara es situa a la part centre-dreta de la entrada de la dàrsena on s'aprecia una erosió més significativa. En el 2008 el calat de la zona esmentada era d'uns 14 metres i al 2009 ja és d'uns 17 (Figura 16).

Aquesta zona no està situada a tocar de cap moll, per tant, es pot deduir que la soscavació ha sigut produïda degut a les maniobres dels bucs per col·locar-se en la òptima posició per atracar o durant la maniobra de sortida de la dàrsena.

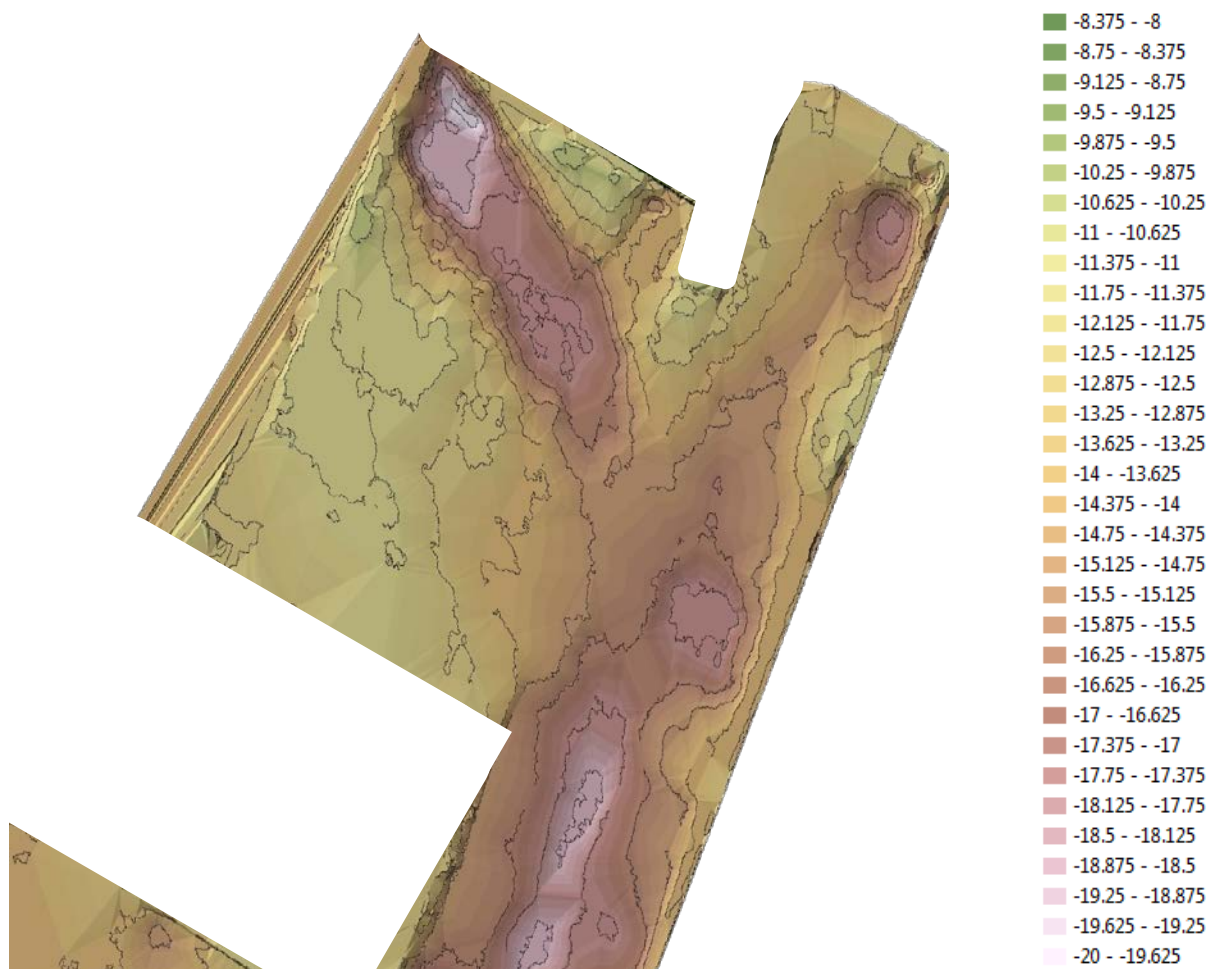


Figura 16. Erosió de la dàrsena a l'any 2009

- Any 2010

A l'any 2010, l'erosió a la cantonada dels molls 20D i 21A és més que evident amb una profunditat que arriba als 19 metres. La zona centre-dreta esmentada anteriorment també augmenta la erosió, ja arriba als 19 metres de calat. A més a més, apareix una nova zona erosionada en el mòdul 1 del moll 20D (Figura 17).

Per tant després de 3 anys d'evolució tenim que pràcticament la totalitat del moll 20D ha patit un soscavació considerable, ja que, ara té un calat d'uns 19 metres en els mòduls 1, 2, 5 i 6. Els mòduls 3 i 4 tenen un calat de 10 metres aproximadament. Aquesta disminució de calat en els quatre mòduls i augment de calat en els altres dos és degut al moviment de terra provocat per les hèlix dels vaixells a l'hora de maniobrar. Per una part, es veu un augment de 2 metres en els mòduls 3 i 4 a causa de una sedimentació. Per l'altra, es veu

una disminució de 7 metres a causa de una soscavació en els mòduls 1, 2, 5 i 6.

Aquests indicadors són especialment importants a l'hora de detectar el vaixell crític a partir de la base de dades de maniobres de bucs en aquesta dàrsena.

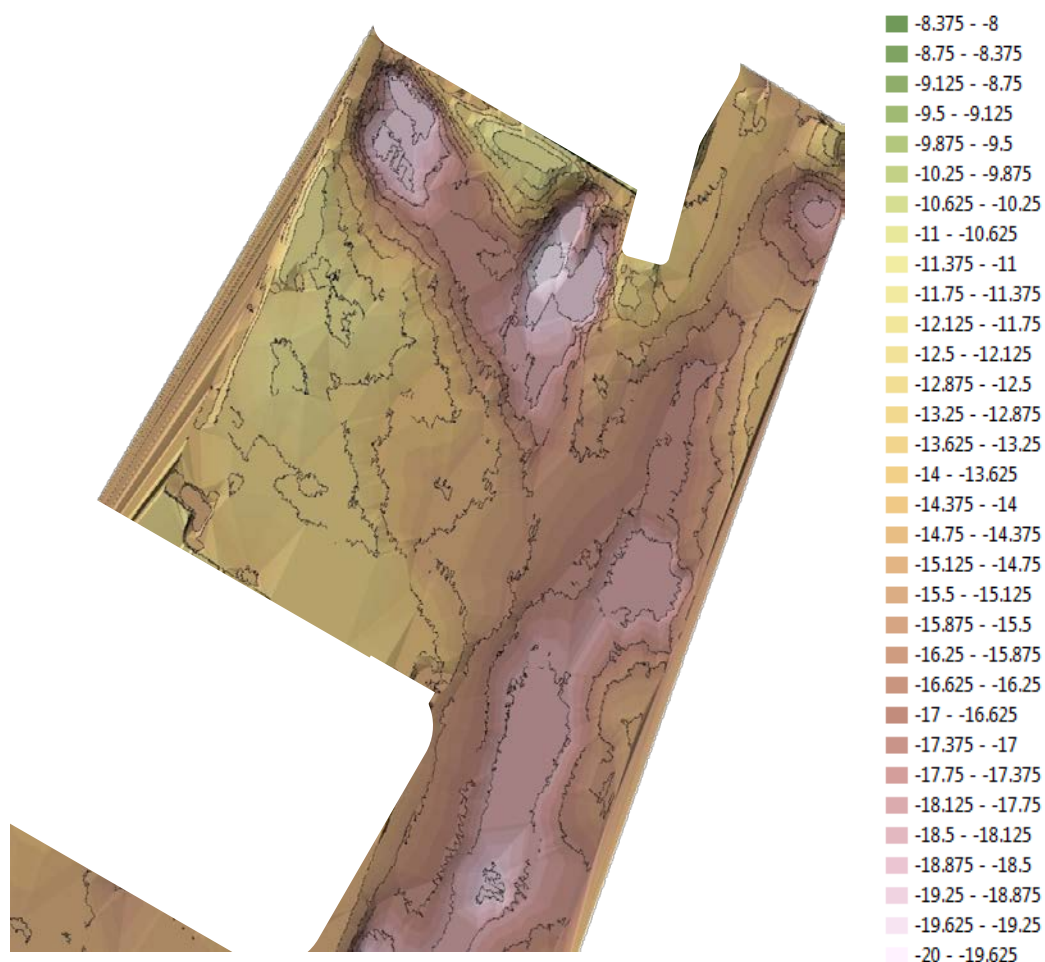


Figura 17. Erosió de la dàrsena a l'any 2010

- Any 2011

L'erosió l'any 2011 augmenta com ha passat amb tots els anys que s'han analitzat. Respecte l'any 2010 simplement augmenta el calat de les zones esmentades en tot l'anàlisi i també la superfície (Figura 18).

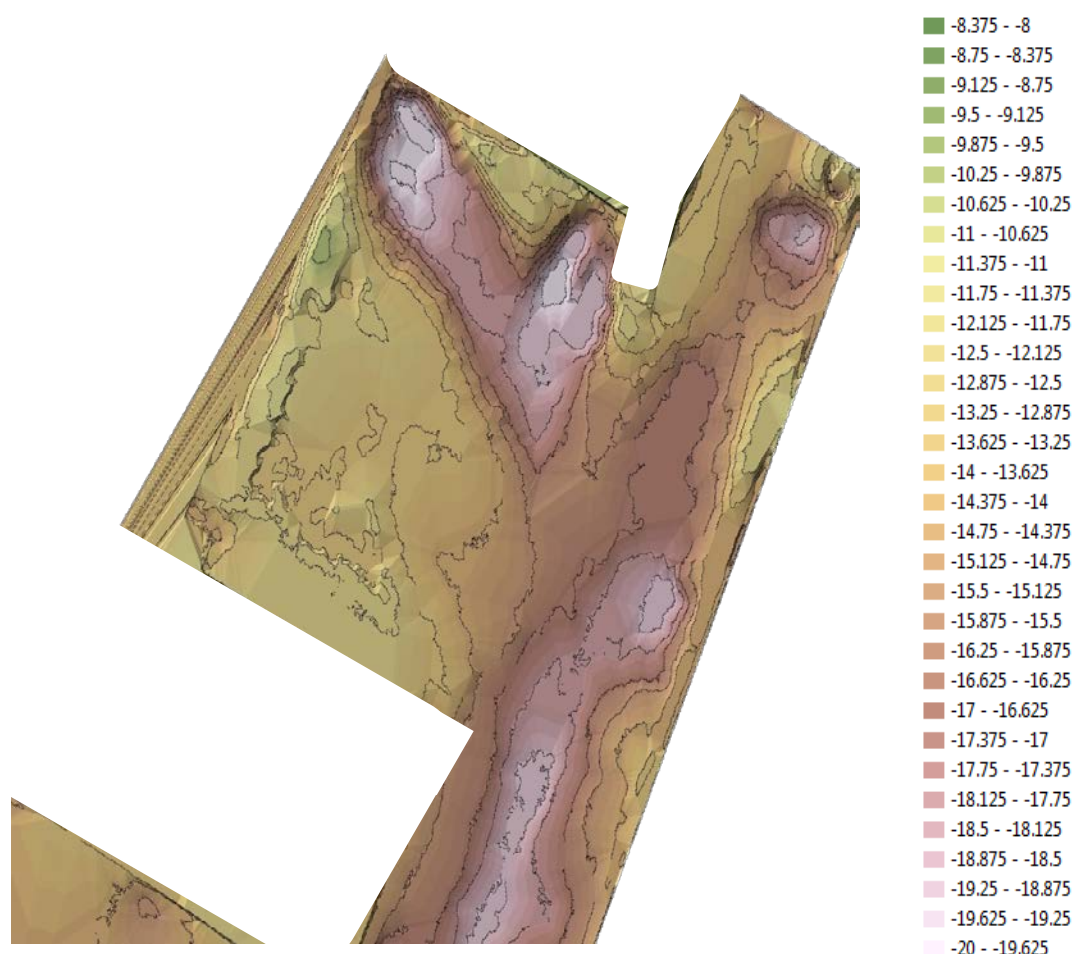


Figura 18. Erosió de la dàrsena a l'any 2011

- **Evolució 2007-2011**

De l'evolució batimètrica que s'observa, es detecta un progressiu augment del calat (erosió) concentrat en la cantonada Moll Ponent-Moll Costa (arriba fins a uns -20 metres). També s'aprecia una evolució semblant cap a la cantonada Moll Ponent - Testera Moll Ponent. Si el calat inicial se suposa és de -12 m, s'han produït soscavacions d'uns 8 metres.

S'aprecia en la cantonada Moll Costa-Moll Ponent, que la protecció de peu manté el calat a prop del moll, però les soscavacions s'estenen just al finalitzar la protecció de peu.

S'observa un marcat patró d'erosió, segurament en relació a las maniobres d'atracament-desatracament.

- Any 2013

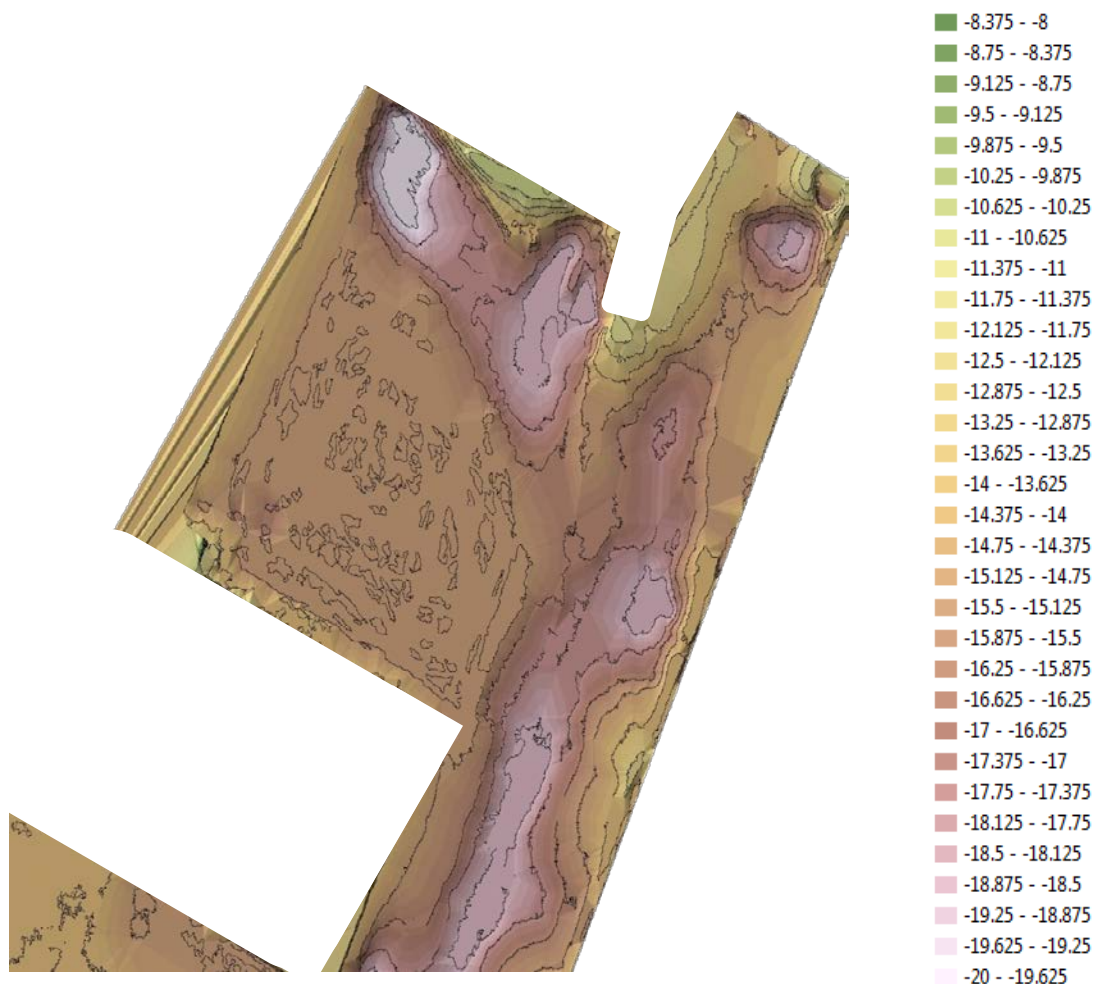


Figura 19. Erosió de la dàrsena a l'any 2013

La Figura 19 ens mostra l'última informació disponible sobre l'erosió de la dàrsena, exactament del dia 27 de març de 2013, però com es pot veure tota la zona que no estava gairebé afectada i que tenia un calat de uns 12 de metres de profunditat, ara en té 16. Això és degut a que es va dragar tota la dàrsena.

4.2 Freqüències dels vaixells, buc crític

Aquest anàlisi es farà a partir d'una base de dades obtinguda durant els anys 2008 i 2012 (tots dos inclosos) que l'Autoritat Portuària de Barcelona va

proporcionar. S'analitzarà els 5 anys per separat i després es trauran unes conclusions al respecte.

La base de dades proporciona una sèrie de paràmetres sobre l'atracament dels vaixells. Entre aquest paràmetres hi ha dades sobre les dimensions del vaixell, com per exemple, el calat, l'eslora, la màniga; així com també les dates de entrada i sortida del Port de Barcelona i la ubicació exacta dins de la dàrsena del Morrot.

Durant els 5 anys (2008-2012), segons la base de dades, s'han realitzat 3.355 entrades a la dàrsena, i per tant 3.355 sortides. És a dir, 6.710 moviments enregistrats dins la dàrsena. D'aquests 6.710 moviments, 3.556 són realitzats al moll 21A, 2.366 al moll 20D i, la resta al moll 22A. Dels 3.556 moviments del moll 21A, 2.920 afecten al mòdul 1 del moll. Dels 2.366 moviments del moll 20D, 910 afecten als mòduls 5 i 6 (principalment al 5).

Per fer l'anàlisi es consideraran rellevants dos paràmetres sobre la resta de la base de dades. El calat del buc i la freqüència amb la que atraquen dins la dàrsena.

Primer de tot es consideraran els calats més grans ja que de tots el vaixells que han passat pel moll, el que tenia menys calat era de 1,9m i el que més de 11,51 (l'any 2010 un parell de vegades). També es consideraran tots aquells vaixells que anualment tinguin una alta freqüència d'atracaments independentment del seu calat. Per facilitar el treball s'ha considerat que un vaixell amb una freqüència alta i un calat alt pot ser un bon indicador de vaixell crític.

Després d'un primer cop d'ull a totes les dades dels 5 anys s'han considerat tots aquells calats superiors o iguals a 7metres per trobar aquest buc crític.

A partir d'aquesta primera hipòtesis en que es consideraran que els calats iguals o superiors a 7 metres són els més crítics de cara a l'erosió, ara s'ha de veure quins vaixells són els més freqüents perquè seran els que més erosió acumulada faran.

És clar, que si trobem un buc amb un calat inferior a 7 metres però amb una freqüència clarament rellevant també es considerarà aquell buc com a candidat a crític.

- **Any 2008**

Els vaixells de nom Cala Pula, Pilo, Pedra i Palma han atracat 7 vegades cada un durant el 2008 i tenen tots 4 un calat de 8,75m. Tots 4 al moll Ponent (sud), que a partir d'ara serà anomenat com a 20D, tal i com s'ha fet posteriorment. L'eslora d'aquests vaixells es de 189,7m i ocupen del mòdul 1 al 4.

Els vaixells Cruise Barcelona i Roma han atracat 32 vegades (4 al moll 20D i 28 al moll Costa, d'ara en davant el moll 21A) i 117 vegades (10 al 20D i 107 al 21A) respectivament. És evident que la dada més important és les 107 vegades al moll 21A ocupant 5 mòduls, del 1 al 5, ja que tenen una eslora de 225m. El calat d'aquests vaixells es de 7m.

Del 2008 s'hauria de veure que és més crític, si la freqüència d'un vaixell o el seu calat, ja que es disposa d'uns vaixells de 8,75m de calat amb 24 atracaments al mateix moll o 135 atracaments (28+107) d'uns vaixells amb calat de 7.

Hi ha 3 vaixells, fora de la hipòtesis inicial, el Florència, Eurostar Barcelona i Eurostar Roma que tenen una alta freqüència però calats inferiors a 7m. En particular, el Florència, que té un calat de 6,5m amb una freqüència de 130 atracaments al 21 A i 11 al 20D.

Per tant, la freqüència és considerada el paràmetre més rellevant, com seria d'esperar ja que erosiona més un buc de 7 metres de calat amb 100 atracament per any que un buc de 10 metres de calat amb només 5 atracaments per any, aquests 3 bucs fora de la hipòtesis inicial s'hauran de tenir en compte de cara a treure unes conclusions acurades.

- **Any 2009**

Tornen a aparèixer els Cruise Barcelona i Roma, però amb més freqüència; 107 (21 A) i 11 (20D), i 130 (21 A) i 7 (20D) respectivament.

El Florència torna a tenir alta freqüència (113 al 20D i 30 al 21 A) i apareix amb 44 atracaments al 20D, el vaixell Aegen Heaven amb 6,92m de calat.

Segons aquests dos anys analitzats sembla que el Cruise Roma i el Cruise Barcelona són els potencials generadors de l'erosió dins la dàrsena, així com el Florència que, tot i no entrar dins la hipòtesis inicial, probablement s'hauria de seguir considerant com a possible candidat a crític fins al final de l'anàlisi.

- **Any 2010**

De nou el Cruise Barcelona i Roma amb 104 atracaments al 20D i 44 al 21A el primer, i 61 al 20D i 24 al 21A el segon.

Vaixell Jose Maria Entrecana, amb una freqüència de 25 atracaments al moll 20D i un calat de 7,1m i 210m d'eslora, ocupant del mòdul 1 al 5.

A destacar aquest any la freqüència del Martí i Sóller, amb 53 atracaments però amb un calat només de 5,7m.

Pel que fa al Superfast (Galicia, Levante, Andalucia, Balears, etc.) només a l'any 2010 té una freqüència alta, però 4 o 5 cops inferior al de Cruise Roma i Cruise Barcelona (unes 50 vegades entre tots el superfast). El motiu pel que no entra en l'anàlisi és perquè no entra dins dels calats superiors a 7m. Menys el Balears i Andalucia, la resta són vaixells de calats inferiors a 7m i just el Levante és el de més freqüència i té un calat de 6,5m.

- **Any 2011**

Cruise Barcelona i Roma entre 100 i 150 atracaments cada una.

Florència amb 101 atracaments i altres vaixells amb un rang variable d'atracaments entre 25 i 50, però amb calats inferiors a 7m, com el Martí i Sóller, un altre cop, o el IkarusPalace.

- **Any 2012**

Cruise Barcelona i Roma tornen a destacar sobre la resta de bucs i, per tant, ja sent l'últim any per analitzar, són els dos bucs que clarament són els potencials candidats, principals responsables de l'erosió ocasionada dins de la dàrsena.

EurocargoGènova i Ravenna, dos vaixells amb calats de 7,5m i una freqüència de 35 al 20D i 3 al 21A, i 53 a 20D i 19 al 21A respectivament. Tenen una eslora de 200m i ocupen 4 mòduls, del 1 al 4.

Florència i IkarusPalace també amb una freqüència de uns 50-100 atracaments aquest any.

- **Conclusions de l'anàlisi de bucs i definició del buc escollit com a principal causant de les erosions.**

Dóna la casualitat que el vaixell que té més freqüència durant els 5 anys és un vaixell amb calat de 7 metres, just al límit de la hipòtesi considerada al inici. Si la hipòtesi principal hagués estat que els calats inferiors a 8 metres no eren crítics, durant l'anàlisi de les dades per trobar el principal buc crític s'hauria detectat un vaixell amb les freqüències més altes durant els 5 anys amb un calat no gaire inferior al crític i, per tant, s'hauria canviat la hipòtesi o s'hauria considerat crític degut a la màxima freqüència.

És exactament el que s'ha aplicat amb el buc Florència. Com que només es busca un buc de cara a centrar els posteriors anàlisis, i els bucs Cruise Roma i Cruise Barcelona tenen un calat més gran i més freqüència, el buc Florència queda automàticament descartat.

- ✓ És important destacar que, dels 3 molls, 20D 21A i 22A, només s'ha citat del 20D i 21A ja que aproximadament el 90% dels atracaments s'originen en aquests dos molls.
- ✓ Cada any hi ha al voltant de 700 atracaments, 600 dels quals es realitzen en aquests molls. Quan un vaixell fa uns 150 atracaments vol dir que el 25% dels atracaments del any en aquests molls els fa només un vaixell.
- ✓ Els Cruise Barcelona i Roma són els més crítics amb un calat de 7m i una freqüència entre tots dos de uns 200-300 atracaments a l'any. Un 34% aproximadament del total dels atracaments durant l'any i un 38% dels atracaments realitzats sobre els molls 21A i 20D. En particular, sobre el mòdul 1 del moll 21A.

S'està parlant sempre de dos bucs tot i que s'ha estipulat que només en seria un però, de fet, les característiques de tots dos bucs són les mateixes i només canvia el nom. Per tant, es considerarà que tots dos Cruise són un mateix buc (es considerarà Cruise Roma i Cruise Barcelona un de sol, a partir d'ara, s'anomenarà Cruise BR).

- **Característiques del Cruise BR**

Considerant com a fonts d'informació la pàgina web de marinetraffic (www.marinetraffic.com) o la pròpia de Grimaldi Lines (www.grimaldi-lines.com) i també, la fitxa tècnica i la base de dades sobre els bucs que han atracat a la dàrsena durant els anys 2007-2011 proporcionada per l'Autoritat Portuària de Barcelona, s'ha arribat a la conclusió que s'han d'escollir uns valors sobre les dimensions i sobre les dades mecàniques que es consideraran per fer tots els càlculs, ja que hi havia algunes diferències en les fonts consultades.

Així doncs:

Taula 2. Dades rellevants escollides de varies fonts d'informació del Cruise BR

Cruise BR	
Eslora	225 m
Màniga	30 m
Calat	7 m
Potència (per hèlix)	13.860 KW
Tones brutes	55.000 t

Altres dades sobre el Cruise BR (Figura 20):

Cruise Ferry d'última generació, velocitat 28 nusos, 411 cambres climatitzades amb bany i dutxa, 50 junior suites, 18 Owner's suites, 150 butaques, restaurant "a la carta", self-service, cafeteria, piscina amb bar y restaurant fast-food. Sala d'estar principal SMAILA'S, discoteca, casino, healthcenter, sala de videojocs, sala de jocs per nens, sala de conferències, boutique, supermercat. Capacitat: 2.200 passatgers + 3.000 m³/l + 215 turismes de garatge



Figura 20. Buc Cruise Barcelona de Grimaldi Lines.

4.3 Buc de càlcul segons la ROM

A partir d'ara, s'aplicarà els passos esmentats en el capítol 3.

Per poder caracteritzar el Cruise BR, el buc crític definit, s'utilitzaren les taules extreïdes de la ROM 2.0-11 (Taula 3) i, segons els paràmetres representatius dels bucs en funció de la seva topologia i capacitat de càrrega, es caracteritzarà el vaixell de càlcul.

Taula 3. Paràmetres representatius dels bucs en funció de la seva tipologia i capacitat de càrrega (ROM 2011)

TIPO DE BUQUE	CLASE	GT	Δ_{PC} (t)	L (m)	L_{pp} (m)	B (m)	T (m)
FERRIES	FERRIES CONVENCIONALES (Ro-Ro, Ro-Pax and Cruise Ferries)	50.000	82.500	309	291	42,6	21,4
		40.000	66.800	281	264	39,9	19,7
		30.000	50.300	253	237	37,2	18,0
		20.000	33.800	219	204	33,6	15,9
		15.000	25.500	197	184	31,3	14,5
		10.000	17.100	170	158	28,3	12,8
		7.000	12.100	150	139	25,9	11,5
		5.000	8.690	133	122	23,8	10,4
		3.000	5.260	110	101	20,9	8,8
		2.000	3.540	95	87	18,9	7,8
		1.000	1.790	74	68	15,9	6,3
	FERRIES RÁPIDOS MULTICASCO (Multihull Fast Ferries)	9.000	3.100	127	117	30,5	8,3
		6.000	2.100	107	93	26,5	9,5
		5.000	1.700	97	83	24,7	7,8
		4.000	1.400	92	79	24,0	7,3
		2.000	700	85	77	21,2	6,5
		1.000	350	65	62	16,7	6,2
		500	175	46	41	12,3	4,0
		250	96	42	37	11,6	4,3
TIPO DE BUQUE	CLASE	GT	Δ_{PC} (t)	L (m)	L_{pp} (m)	B (m)	T (m)
CRUCEROS (Cruise Ships)	6.300 ²⁷⁾	225.000	110.000	362	326	47,0	24,8
	4.500	155.000	77.000	350	315	39,0	23,8
	4.000	145.000	72.000	340	306	38,9	23,5
	3.000	140.000	70.000	325	293	38,6	22,7
	2.500	120.000	65.700	294	265	35,5	22,5
	2.000	95.000	47.500	272	245	35,0	22,0
	1.500	70.000	39.700	263	237	32,2	21,3
	1.000	50.000	29.200	235	200	32,2	20,9
	800	35.000	21.000	192	175	29,8	19,7
	500	30.000	18.000	173	159	27,7	17,6
	250	20.000	12.000	151	139	25,1	15,1
	200	15.000	9.000	133	124	22,9	13,2
	175	10.000	6.000	119	111	21,1	11,6
	150	6.000	3.600	99	94	18,6	9,6
	—	4.000	2.400	86	82	16,7	8,2
	—	2.000	1.200	68	65	14,1	6,3

Clarament es postulen com a caracteritzacions del buc de càlcul dues, Ferrie Convencional o Creuer.

Segons les dades que s'ha obtingut del Cruise BR la caracterització més acurada és la de Creuer, com es mostra a la Taula 4:

Taula 4. Paràmetres representatius dels bucs definits com a Creuer i Ferry en comparació amb el Cruise BR (verd, més proper a les dades del Cruise BR; vermell, més allunyat)

	Cruise BR	Creuers	Ferries
Eslora (L) en m	225	235	219
Màniga (B) en m	30	32,2	33,6
Arqueig Brut (GT) en t	55000	50000	20000

Segons la taula anterior, pel que fa a la mida del buc, podria ser tant un Ferry com un Creuer, però el factor determinant ha estat clarament l'arqueig brut, que acaba fent que la caracterització del buc es decanti per el Creuer.

4.4 Avaluació de l'erosió a partir del buc de càlcul

En aquest cas, es considerarà que les dades del buc són desconegudes. Per tant, es determinaran els valors segons el tipus de buc aplicant la ROM 2.0-11 i, així, substituir aquests valors a les fórmules i trobar la velocitat de les hèlixs.

Primer es calcula la velocitat de l'hèlix de popa en espai no confinat i la de l'hèlix transversal en espai confinat, tal i com descriu la ROM. A continuació, les respectives velocitats en el fons marí i, finalment, l'erosió provocada per aquestes velocitats.

Es començarà per agafar la formula i donar-li valors a les constants.

Donada:

$$V_{C,Hèlix\ Popa} = F_T \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{P / \rho_\omega \cdot D_0^2} \cdot \frac{D_0}{h_h}$$

Substituint:

$$V_{C,Hèlix\ Popa} = 2 \cdot 0,4 \cdot 1,1 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{P / 1025 \cdot 5^2} \cdot \frac{5}{7,4}$$

On:

F_T : 2, segons la ROM 2.0-11

- C_1 : 0.4, com a valor usual segons la ROM 2.0-11
- C_2 : 1.1, tenint en compte que és atracament lateral segons ROM 2.0-11
- P : 40% Potència màxima del buc. Segons l'apartat 3.3.1.3 i 3.3.1.4 de la ROM 3.1-99 es calcula amb la fórmula següent:

$$W = W_0 \cdot (\Delta/1000)^{2/3} \cdot (V_r/10)^3$$

W_0 : Segons la taula 3.2 de la ROM 3.1-99 per a creuers està entre 300 i 400 CV.

Δ : Segons la taula 3.1 de la ROM 3.1-99 per a creuers de 234 m d'eslora (semblant al buc crític) és de 29.000 t.

V_r : Segons la taula 3.2 de la ROM 3.1-99 per a creuers:

$$1,9 < V_r \cdot L_{pp}^{-1/2} < 2,2$$

L_{pp} : Essent pel nostre cas de creuer de 234 m, 199 m.

Per tant V_r estarà entre 27 nusos i 31 nusos.

La Potència es calcularà considerant dos casos, el de $W_0 = 300$ CV i $V_r = 27$ nusos (interval inferior) i el de $W_0 = 400$ CV i $V_r = 31$ nusos (interval superior)

ρ_w : 1025 Kg/m³

D_0 : 70% calat en desplaçament de llast, i el calat mig d'un creuer segons la ROM 3.1-99 (taula 3.1) és de 7,1m per a creuers amb eslora total de 234 m. Per tant, el diàmetre de la hèlix serà de 5 m. aprox.

h_h : tenint en compte que el calat de la dàrsena era de 12 metres aproximadament al 2007 i el calat mig d'un creuer segons la ROM 3.1-99 és de 7,1m per a creuers amb eslora total de 234m, molt a prop del buc crític. Hi ha 4,9 metres entre el buc i el fons marí. La distància entre el eix de la hèlix i el fons marí serà d'uns 7,4m.

Ara amb aquestes dades tindrem un interval de velocitats de l'hèlix segons la ROM 3.1-99 i la ROM 2.0-11.

La fórmula considerant $W_0 = 300$ CV i $V_r = 27$ nusos dóna una Potència W :

$$W = 300 \cdot (29000/1000)^{2/3} \cdot (27/10)^3$$

$$W = 55.000 \text{ CV} = 40.440 \text{ KW}$$

Per tant:

$$V_{C,Hèlix \text{ Popa}} = 2 \cdot 0,4 \cdot 1,1 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{16.175.000 / 1025 \cdot 5^2 \cdot \frac{5}{7,4}}$$

$$V_{C,Hèlix \text{ Popa}} = 5.97 \text{ m/s}$$

Si es considera $W_0 = 400 \text{ CV}$ i $V_r = 31$ nusos ens dona una Potència W :

$$W = 400 \cdot (29000 / 1000)^{2/3} \cdot (31 / 10)^3$$

$$W = 112.000 \text{ CV} = 82.360 \text{ KW}$$

Per tant:

$$V_{C,Hèlix \text{ Popa}} = 2 \cdot 0,4 \cdot 1,1 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{32.945.000 / 1025 \cdot 5^2 \cdot \frac{5}{7,4}}$$

$$V_{C,Hèlix \text{ Popa}} = 7.56 \text{ m/s}$$

Per tant les velocitats de l'hèlix estaran compreses entre 5,97 m/s i 7,56 m/s.

Aquest és l'interval de velocitats que s'obtidria. A continuació es mostren unes gràfiques per veure com varia la velocitat de les hèlixs depenent de la potència o depenent de l'alçada entre l'eix de l'hèlix i el fons marí.

A la Figura 21 es mostra l'evolució de la velocitat de l'hèlix en funció de la potència. Quan major sigui la potència del motor que mou l'hèlix major serà la velocitat de l'hèlix.

Com que la potència en aquest cas depèn de W_0 i de V_r , s'agafaran 3 valors per poder definir la gràfica. Els valors de W_0 seran 300, 350 i 400 CV associats a 3 valors de V_r respectivament: 27, 29 i 31 nusos.

Taula 5. Valors per al disseny de la Figura 21

W_0 (CV)	V_r (nusos)	Potència (KW)	V_0 (m/s)
300	27	40.440	5,97
350	29	59.680	6,80
400	31	82.360	7,56

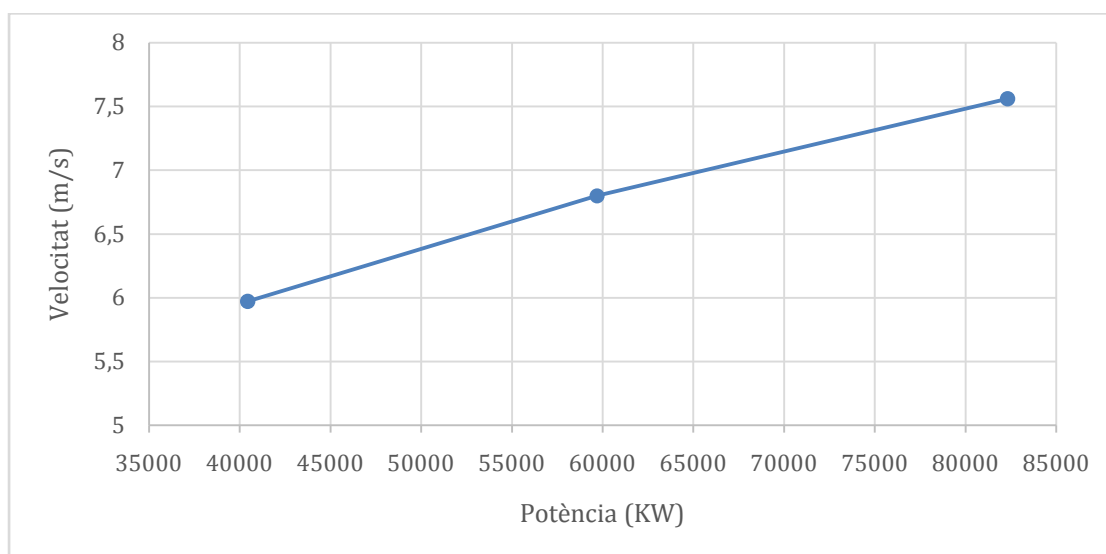


Figura 21. Velocitat de l'hèlix en funció de la potència emprada

La Figura 22 mostra la disminució de la velocitat a mesura que augmenta la h_h . S'han agafat com a valors de h_h 4, 5, 6, 7, 8, 9, i 10 metres. S'ha calculat la velocitat amb cada un dels valors i ha donat 12.57, 10.06, 8.38, 7.18, 6.29, 5.59, 5.03 m/s respectivament.

Taula 6. Valors per al disseny de la Figura 22

h_h (m)	V_0 (m/s)	V_b (m/s)
4	12,57	6,60
5	10,06	4,23
6	8,38	2,93
7	7,18	2,15
8	6,29	1,65
9	5,59	1,30
10	5,03	1,06

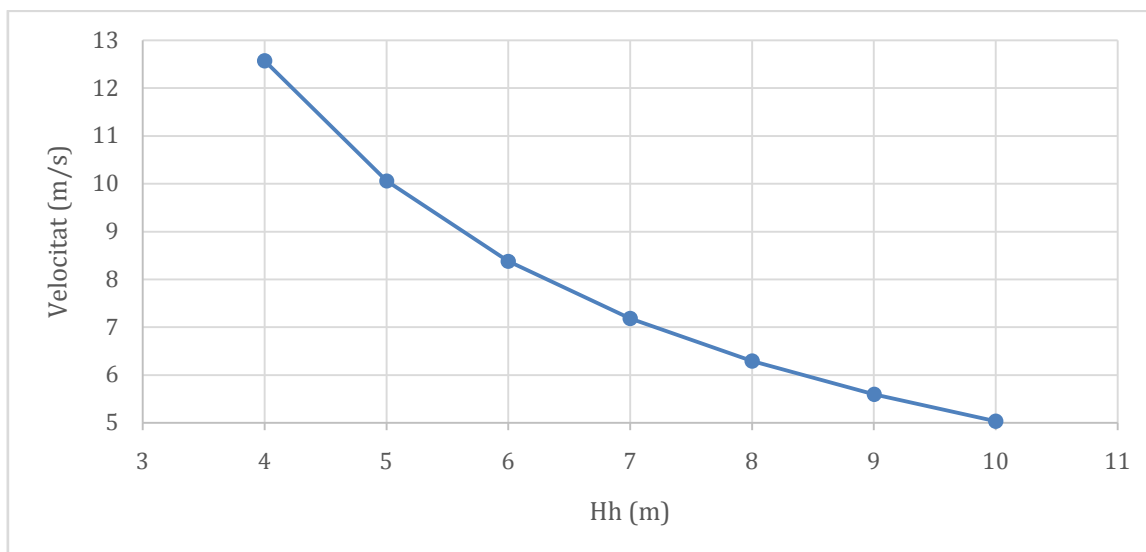


Figura 22. Disminució de la velocitat de l'hèlix de popa en funció de h_h

Ara que l'hèlix de popa ja està calculada, es procedeix a calcular la transversal en espai confinat.

Donada:

$$V_{C,Hèlix\ Trans} = F_T \cdot C_3 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{trans}}{\rho_w \cdot D_{0trans}^2}} \cdot \frac{D_{0trans}}{h_h + l_h}$$

Substituint:

$$V_{C,Hèlix\ Trans} = 2 \cdot 2,8 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{1.500.000}{1025 \cdot 2,4^2}} \cdot \frac{2,4}{7,1 + 12,8}$$

On:

F_T : 2, segons la ROM 2.0-11

C_3 : 2.8, com a valor usual segons la ROM 2.0-11 quan l'eix de l'hèlix és perpendicular a la línia d'atracament.

P_{trans} : 100% Potència màxima del buc o $P_h = 3 \cdot 10^{-2} \cdot TPM$ (mín 750 KW). Segons la taula 3.1 de la ROM 3.1-99 la TPM d'un creuer de 234 m d'eslora és de 50000 t. Per tant la $P_h = 1500$ KW

ρ_w : 1025 Kg/m³

D_{0trans} : $1,75 \cdot 10^{-5} \cdot TPM + 1,5$. Segons la taula 3.1 de la ROM 3.1-99 la TPM d'un creuer de 234 m d'eslora (el més proper al nostre buc pilot) és de 50000 t. Per tant, $D_0 = 2,4$ m

h_h : tenint en compte que el calat de la dàrsena era de 12 metres aproximadament al 2007 i el calat mig d'un creuer segons la ROM 3.1-99 és de 7,1m per a creuers amb eslora total de 234m, molt a prop del buc crític. Hi ha 4,9 metres entre el buc i el fons marí. La distància entre el eix de la hèlix i el fons marí serà de $4,9 + 1,2 +$ distància entre la part més profunda del buc i la hèlix transversal que es considerarà un metre (per falta d'informació). Per tant $h_h = 7,1$ m.

l_h : $0,15 \cdot$ màniga buc ($\text{mín} l_h = 1,8 \cdot h_h$). Segons la taula 3.1 de la ROM 3.1-99 la màniga d'un creuer d'eslora de 234 m és de 32,2 m. Per tant $l_h = 4,8$ m. Però $\text{mín} l_h = 1,8 \cdot 7,1 = 12,8$ m.

Ara amb aquestes dades que s'han considerat adients, la fórmula dóna:

$$V_{C,Hèlix Trans} = 5.1 \text{ m/s}$$

En aquest cas la Figura 23 mostra la variació de la velocitat en funció de h_h i de l_h (que ja depèn de h_h). Per tant serà en funció de h_h . Com s'ha fet en les gràfiques anteriors, a través de la taula es mostren els valors utilitzats pel disseny de la gràfica.

Taula 7. Valors per al disseny de la Figura 23

H_h (m)	L_h (m)	$h_h + l_h$ (m)	V_0 (m/s)	V_b (m/s)
4	7,2	11,2	8,89	3,79
5	9	14	7,11	2,42
6	10,8	16,8	5,92	1,68
7	12,6	19,6	5,08	1,24
8	14,4	22,4	4,44	0,94
9	16,2	25,2	3,95	0,75
10	18	28	3,55	0,60

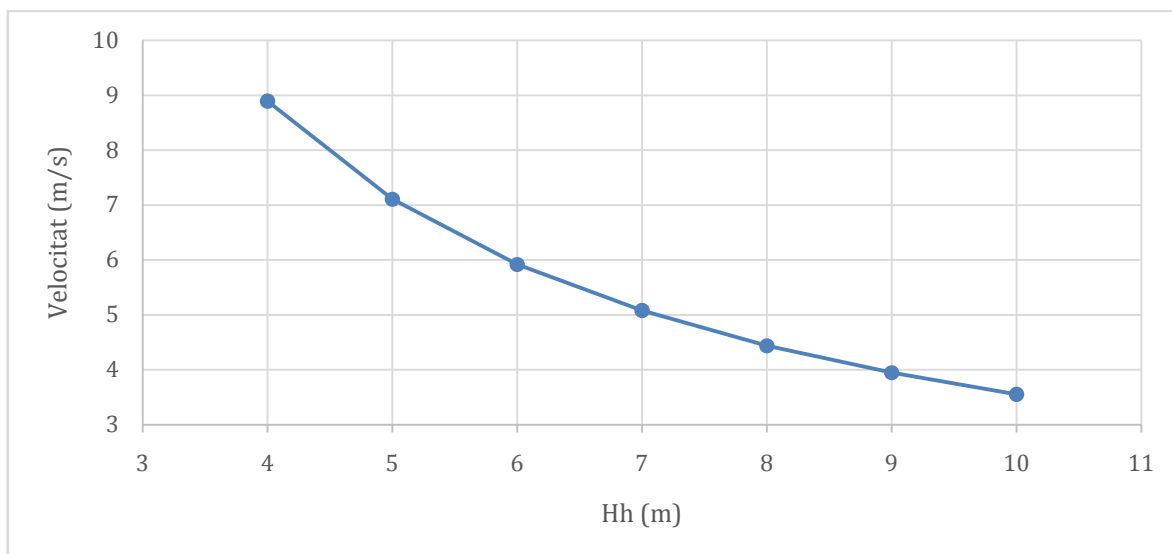


Figura 23. Disminució de la velocitat de l'hèlix transversal en funció de h_h

A continuació es calcula la velocitat en el fons marí tal i com s'especifica a l'apartat 3.2 d'aquest treball:

$$V_b = V_0 \cdot E \cdot \left(\frac{H_p}{D_p} \right)^a$$

Estimació dels dos casos, hèlix popa i hèlix transversal:

- Hèlix de popa

Veure Taula 6

$$V_b = 6,29 \cdot 0,42 \cdot \left(\frac{8}{5} \right)^{-1} = 1,65 \text{ m/s}$$

- Hèlix transversal

Veure Taula 7:

$$V_b = 5,08 \cdot 0,71 \cdot \left(\frac{7}{2,4} \right)^{-1} = 1,24 \text{ m/s}$$

Segons la ROM 0.5-0.5, les velocitats crítiques per un sol cohesiu està entre 1 i 3 m/s (Taula 8). Per tant, la velocitat és crítica, és a dir, s'ha de tenir en compte perquè existirà erosió.

Taula 8. Velocitat crítica segons el tipus de sol (ROM, 2005)

Tipo de suelo	Velocidad crítica
Suelos cohesivos	1 – 3 m/s
Arcilla consolidada	1.2 m/s
Arenas finas, no consolidadas	0.5 m/s
Suelos granulares y escolleras	$v_{crit} = [A \cdot g (G - 1) D_{50}]^{1/2}$ $A = 0.5 - 1$ (forma de partículas) $g = ac.$ Gravedad; $G =$ densidad relativa

Finalment, es calcularà la profunditat de soscavació tal i com s'explica a l'apartat 3.3 d'aquest treball.

En aquest apartat es proposen dos mètodes diferents. Per seguir amb les normes i recomanacions de la ROM com s'ha fet durant tot l'estudi, es calcularà la profunditat amb les eines proposades per la ROM 0.5-05:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{F_0}{H_p / D_p} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

Per tant:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{V_0}{\sqrt{g \cdot D_{50} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}}}{H_p / D_p} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

Així doncs per cada una de les velocitats de l'hèlix de popa:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{6,29}{\sqrt{9,8 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2,65 - 1,03}{1,03}}}}{8/5} \right)^{2,9} \cdot 8 = 2,5 \text{ metres.}$$

Taula 9. Valor per al disseny de laFigura24

h_h (m)	V_0 (m/s)	Z_{max} (m)
4	12,57	68,7
5	10,06	23,6
6	8,38	9,8
7	7,18	4,7
8	6,29	2,5
9	5,59	1,4
10	5,03	0,9

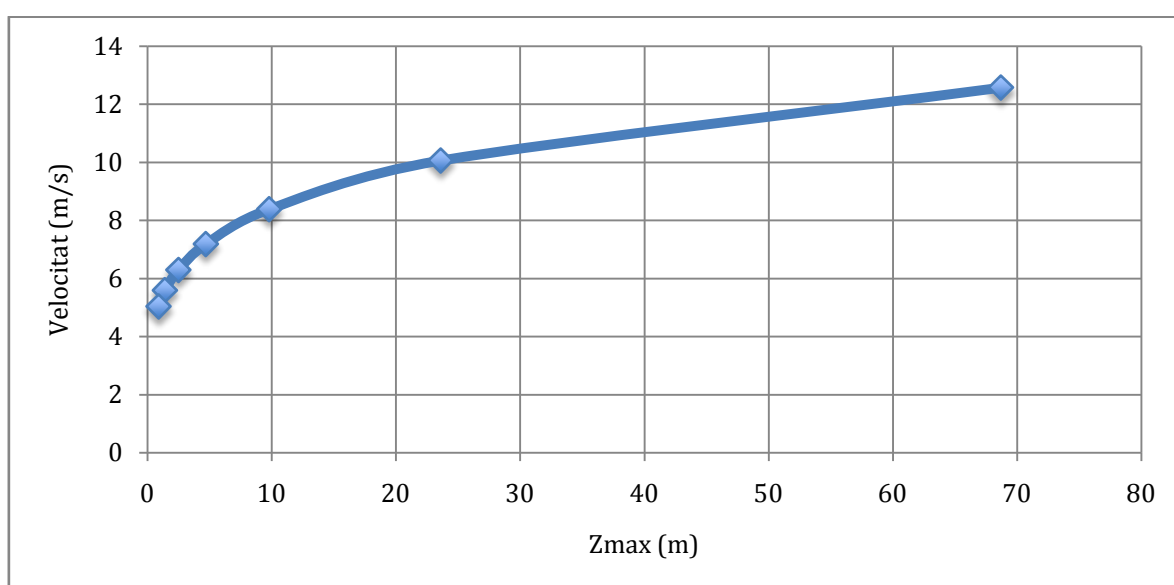


Figura 24. Erosió màxima en funció de la velocitat de l'hèlix de popa

I per cada una de les velocitats de l'hèlix transversal:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{5,08}{\sqrt{9,8 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2,65 - 1,03}{1,03}}}}{7/2,4} \right)^{2,9} \cdot 7 = 0,2 \text{ metres.}$$

Taula 10. Valors per al disseny de la Figura 25

H_h (m)	L_h (m)	$h_h + l_h$ (m)	V_0 (m/s)	Z_{max} (m)
4	7,2	11,2	8,89	3
5	9	14	7,11	1
6	10,8	16,8	5,92	0,4
7	12,6	19,6	5,08	0,2
8	14,4	22,4	4,44	0,1
9	16,2	25,2	3,95	0,06
10	18	28	3,55	0,04

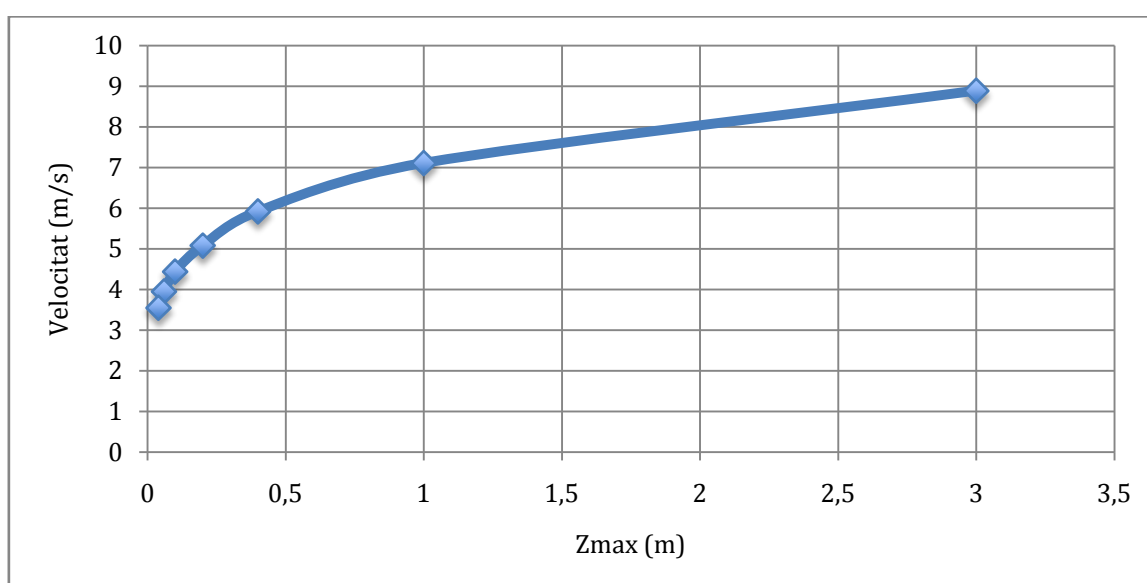


Figura 25. Erosió màxima en funció de la velocitat de l'hèlix transversal

4.5 Avaluació de l'erosió a partir del buc crític

En aquest cas, es consideraran totes les dades conegudes del buc Cruise BR, i si alguna dada no és coneguda, s'utilitzaran les recomenacions de la ROM.

Com en el apartat 4.4, primer es calcula la velocitat de l'hèlix de popa en espai no confinat i la de l'hèlix transversal en espai confinat, tal i com descriu la ROM. A continuació, les respectives velocitats en el fons marí i, finalment, l'erosió provocada per aquestes velocitats.

Començarem per agafar la formula i donar-li valors a les constants.

Donada:

$$V_{C,Hèlix Popa} = F_T \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2}} \cdot \frac{D_0}{h_h}$$

Substituint:

$$V_{C,Hèlix Popa} = 2 \cdot 0,4 \cdot 1,1 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{5.544.000}{1025 \cdot 5,6^2}} \cdot \frac{5,6}{7,8}$$

On:

F_T : 2, segons la ROM 2.0-11

C_1 : 0.4, com a valor usual segons la ROM 2.0-11

C_2 : 1.1, tenint en compte que és atracament lateral segons ROM 2.0-11

P : 40% Potència màxima del buc, 13.860 KW per hèlix

ρ_w : 1025 Kg/m³

D_0 : 5,6m

h_h : tenint en compte que el calat de la dàrsena era de 12 metres aproximadament al 2007 i el calat del buc és de 7. Tenim 5 metres entre el buc i el fons marí. La distància entre el eix de la hèlix i el fons marí serà d'uns 7,8 m.

Per tant:

$$V_{C,Hèlix Popa} = 4.12 \text{ m/s}$$

Ara que l'hèlix de popa ja està calculada, es procedeix a calcular la transversal en espai confinat.

Donada:

$$V_{C,Hèlix Trans} = F_T \cdot C_3 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{trans}}{\rho_w \cdot D_{0trans}^2}} \cdot \frac{D_{0trans}}{h_h + l_h}$$

Substituint:

$$V_{C,Hèlix\ Trans} = 2 \cdot 2,8 \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{13.860.000 / 1025 \cdot 2,4^2 \cdot \frac{2,4}{7,2 + 13}}$$

On:

F_T : 2, segons la ROM 2.0-11

C_3 : 2.8, com a valor usual segons la ROM 2.0-11 quan l'eix de l'hèlix és perpendicular a la línia d'atrancament.

P_{trans} : 100% Potència màxima del buc, 13.860 KW

ρ_w : 1025 Kg/m³

D_{0trans} : 2,4m ja que la dada no és coneguda i, per tant, s'utilitzaran les recomanacions de la ROM com en el apartat 4.4 d'aquest treball

h_h : tenint en compte que el calat de la dàrsena era de 12 metres aproximadament al 2007 i el calat de Cruise BR és de 7 m. Tenim 5 metres entre el buc i el fons marí. La distància entre el eix de la hèlix i el fons marí serà de 5 + 1,2 + distància entre la part més profunda del buc i la hèlix transversal que es considerad'un metre (per falta d'informació). Per tant $h_h = 7,2m$.

l_h : 0,15 · màniga buc ($mín l_h = 1,8 \cdot h_h$). La màniga del Cruise BR és de 30 m. Per tant $l_h = 4,5m$. Però $mín l_h = 1,8 \cdot 7,2 = 13 m$.

Per tant:

$$V_{C,Hèlix\ Trans} = 10.35 m/s$$

A continuació es calcula la velocitat en el fons marí tal i com s'especifica a l'apartat 3.2 d'aquest treball:

$$V_b = V_0 \cdot E \cdot \left(\frac{H_p}{D_p} \right)^a$$

Estimació dels dos casos, hèlix popa i hèlix transversal:

- **Hèlix de popa**

$$V_b = 4,12 \cdot 0,42 \cdot (7,8/5,6)^{-1} = 1,24 \text{ m/s}$$

- **Hèlix transversal**

$$V_b = 10,35 \cdot 0,71 \cdot (7,2/2,4)^{-1} = 2,45 \text{ m/s}$$

Segons la ROM 0.5-0.5, les velocitats crítiques per un sol cohesiu està entre 1 i 3 m/s (Taula 8). Per tant, s'està dins de la velocitat crítica, és a dir, s'ha de tenir en compte perquè existirà erosió.

Finalment, es calcularà la profunditat de soscavació tal i com s'explica a l'apartat 3.3. Un cop més, s'utilitzaran les eines proporcionades per la ROM 05-0.5 com s'ha fet en el apartat 4.4 a l'hora de calcular la profunditat de l'erosió:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{F_0}{H_p/D_p} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

Per tant:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{V_0}{\sqrt{g \cdot D_{50} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}}}{H_p/D_p} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

Així doncs per l'hèlix de popa:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{4,12}{\sqrt{9,8 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2,65 - 1,03}{1,03}}}}{7,8/5,6} \right)^{2,9} \cdot 7,8 = 1,1 \text{ metres.}$$

Per a la transversal:

$$Z_{m\grave{a}x} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{\frac{10,35}{\sqrt{9,8 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2,65 - 1,03}{1,03}}}}{7,2/2,4} \right)^{2,9} \cdot 7,2 = 1,5 \text{ metres.}$$

Taula 11. Resultats de l'erosió en funció de la velocitat de l'hèlix

Espai	Tipus de buc	h_h (m)	V_0 (m/s)	Z_{max} (m)	$Z_{d\grave{a}rsena}$ (m)
NO CONFINAT	Crític	7,8	4,12	1,1	6
	De càlcul	8	6,29	2,5	
CONFINAT	Critic	7,2	10,35	1,5	8
	De càlcul	7	5,08	0,2	

5. Resultats i discussions

A continuació, després d'haver obtingut diferents resultats en els diferents anàlisis que s'han fet durant l'estudi, es discutirà cada un d'ells i es contrastaran entre ells.

El primer anàlisi és l'anàlisi batimètric. Podem apreciar que durant els 5 anys l'erosió va augmentant, en general, des del centre de la dàrsena fins ala cantonada del moll 20D, i en particular, la cantonada entre el moll 20D i el moll 21A (mòdul 1 moll 21A i mòdul 6 moll 20D).

En aquella zona, la zona crítica és, on l'erosió és més alta, 20 metres de profunditat. Cal però, tenir també en compte la zona del mòdul 1 del moll 20D on l'erosió també arriba als 20 metres de profunditat.

Justament, tant el Cruise Roma com el Cruise Barcelona, el major número de atracaments anuals que fan, el fan al moll 21A, ocupant del mòdul 1 al mòdul 5. Quan ho fan al moll 20D també ho fan del mòdul 1 al mòdul 5. Per tant, exactament les zones on l'erosió és màxima. La zona crítica coincideix amb la zona d'atractament dels vaixells crítics.

Aquesta correlació entre tots dos anàlisis confirmen la suposició inicial de l'estudi, en la que els bucs a l'hora de maniobrar per atracar i desatracar generen erosió en el fons marí de la dàrsena.

Com és obvi, l'erosió no només és generada per el Cruise Barcelona i pel Cruise Roma, sinó també per altres vaixells que s'han anat anomenant en el treball. Però pels diferents anàlisis de l'estudi, necessitem partir de només un buc, el crític, el que genera més erosió en aquest període de 5 anys, el Cruise BR.

A partir d'aquesta correlació entre les batimetries i la freqüència i ubicació d'atractaments del Cruise BR, s'ha calculat l'erosió que produïa tant el buc crític com la del buc de càlcul aplicant la ROM.

Per calcular l'erosió, primer s'ha calculat la velocitat de l'hèlix. Les velocitats de l'hèlix de popa del buc de càlcul són superiors a les del buc crític, degut a que la potència, segons l'aplicació de la ROM, era del ordre de 4 vegades més gran. Amb les velocitats de l'hèlix transversal ha succeït exactament el mateix però, al inrevés. La potència del buc crític és un ordre de magnitud major que la del buc de càlcul. Això és degut a que les dades proporcionades sobre la potència de l'hèlix transversal del buc crític no són fiables, ja que la potència de la hèlix transversal és la mateixa que la de l'hèlix de popa (amb l'hèlix de proa essent dues vegades l'hèlix transversal).

Com es veu a la Figura 21, quanta més potència s'utilitza, més velocitat té l'hèlix i, per tant, més erosió.

Per calcular l'erosió s'han proposat dos mètodes, Hamill (1988) i el de la ROM 0.5-05. Tots dos mètodes estan fora de rang, ja que, només són vàlides per a mides de sediment grans. Per seguir amb la metodologia de les ROM s'ha decidit aplicar el mètode de la ROM 0.5-05.

La ROM hauria d'estar prevista de més eines per calcular l'erosió del fons marí de zones portuàries per diferents mides de sediments.

Com es mostra a la Figura 22 i Figura 23, a mesura que l' h_h augmenta, l'erosió disminueix. Lògicament, quanta més distància hi ha entre l'hèlix i el fons marí, menys efecte de socavació es produeix.

El resultat principal de l'estudi es mostra a la Taula 11. En aquesta es mostra la comparativa entre les h_h , les velocitats i l'erosió tant del buc crític com el de càlcul en espai confinat i no confinat. A més, es mostra la comparativa amb els resultats obtinguts de les batimetries de la dàrsena del Morrot.

A la dàrsena del Morrot hi havia una profunditat de 12m tant a la zona no confinada com a la zona confinada. L'últim any, al 2013, la zona confinada té una profunditat de 20m i la no confinada de 18. Per tant, l'erosió ha sigut de 8 i 6m respectivament.

Si es compara Z_{\max} amb $Z_{\text{dàrsena}}$, l'única conclusió a la que es pot arribar és que, degut a l'aplicació d'una fórmula fora de rang i que la potència dels dos bucs són dispars tant en espai confinat com no confinat, els resultats són no concloents.

En l'espai no confinat, l' h_h del buc crític és igual a 7,8m, per tant, s'ha comparat amb l' h_h del buc de càlcul més propera dels diversos càlculs fets, 8m. Les V_0 obtingudes són dispars en un cert punt, per la diferència de potències.

En l'espai confinat, l' h_h del buc crític és igual a 7,2m, per tant, s'ha comparat amb l' h_h del buc de càlcul més propera dels diversos càlculs fets, 7m. Les V_0 obtingudes són dispars exageradament, per la diferència de potències d'un ordre de magnitud, com s'ha esmentat anteriorment.

6. Conclusions

L'erosió del fons marí dels ports, en particular de la dàrsena del Morrot al Port de Barcelona, és generada principalment com a conseqüència de les maniobres d'atracament i desatracament dels bucs.

La freqüència i el calat dels bucs, així com la seva potència i diàmetre de les hèlixs, són els factors rellevants pel que fa a l'erosió del fons marí. La freqüència és el més significatiu dels quatre.

El Cruise BR és el buc que més erosió genera dins de la dàrsena degut a la seva alta freqüència, amb el 34% dels moviments dins la dàrsena.

Les consideracions de buc crític o buc de càlcul genera algunes diferències en els resultats i, en alguns casos el ús de la ROM no és conservador.

Les dades proporcionades de l'hèlix transversal del buc crític són insuficients per donar validesa total als resultats obtinguts. Per tant, la comparació dels resultats sobre l'hèlix transversal del buc crític i del buc de càlcul és incoherent des de un punt de vista quantitatiu, però si pot ser emprat des de un punt de vista qualitatiu.

Les eines aportades per les ROM i utilitzades pel càlcul de l'erosió són insuficients pel que fa a la mida del sediment del fons marí. En el cas que la mida del sediment és petita, el mètode utilitzat, seguint la ROM, queda fora de rang. Les equacions proposades a la ROM són més adients per valorar mesures de protecció amb esculleres de mida de sediment grans $0.1 < D_{50} < 0.3$ m. La ROM hauria d'incorporar equacions més adients per avaluar erosió dins de les zones portuàries.

Quanta més potència te el buc més velocitat inicial te l'hèlix i, per tant, més erosió generarà. Quanta menys alçada hi ha entre el fons marí i l'eix de l'hèlix, més erosió generarà el buc. Així doncs, el cas més crític és mínima alçada i màxima potència.

Al no poder augmentar el calat dels ports i, per tant, la h_h no pot variar (obviant un increment per canvi climàtic), la disminució de la potència a l'hora de fer les maniobres dins dels ports és una solució que prevé l'erosió i que te un cost 0. Es podria dragar la zona afectada però te un cost econòmic alt i el problema seguiria existint però en menor mesura.

7. Referències

EAU (2004). Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways.

Hamill G. A., Johnston H. T. and Stewart D. P. (1999). Propeller wash scour near quay walls. Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng. 1999.125:170-175.

Hamill G.A., McGarvey J.A. and Hughes D.A.B. (2004). Determination of the efflux velocity from a ship's propeller. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering, 157 (2), 83-91.

Lepiani D. (2011). Socavación por las hélices de barcos en los pies de muelle. Proyecto de Master IGP.

Puertos del Estado (1999). ROM 3.1.99 "Configuración Marítima: Canales de Acceso y Áreas de Flotación".

Puertos del Estado (2005). ROM 0.5-05 "Recomendación Geotécnica para las Obras Marítima y/o Portuaria".

Puertos del estado (2011). ROM 2.0-11 "Recomendaciones para el proyecto y ejecución en las Obras de Atraque y Amarre".

Thoresen C.A. (2010). Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines. Ed Thomas Telford Limited, London.

Valdés JM., Lázaro R., Gutiérrez R.M. y Martín I. (2012). Socavación en las obras de atraque producida por el efecto de las hélices de los buques. IV Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, pag 177. Editor Organismo Público Puertos del Estado.

www.marinetraffic.com

www.grimaldi-lines.com



Agraïments

Projecte de Recerca BIA2012-38676-C03-01 dins del "Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental en el marco del VI Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011".

Autoritat Portuària de Barcelona

Manel Garcia Leon